

**MÁRIO ARLINDO DA SILVA PAZ**

**CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS  
GRAÚDOS DA GRANDE FLORIANÓPOLIS E SUA  
UTILIZAÇÃO EM CONCRETOS DE ALTA  
RESISTÊNCIA**

**Dissertação apresentada ao Curso de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil da  
Universidade Federal de Santa Catarina,  
como parte dos requisitos para a  
obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Civil.**

**Florianópolis  
1998**

**CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS  
GRAÚDOS DA GRANDE FLORIANÓPOLIS E SUA  
UTILIZAÇÃO EM CONCRETOS DE ALTA  
RESISTÊNCIA**

***MÁRIO ARLINDO DA SILVA PAZ***

**Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina,  
como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre  
em Engenharia Civil.**

**Área de Concentração: Construção Civil**

**Orientador: Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Junior**

**Florianópolis  
1998**



PAZ, Mário Arlindo da Silva. **Caracterização dos agregados graúdos da grande Florianópolis e sua utilização em concretos de alta resistência.** Florianópolis, 1998. 142 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Junior

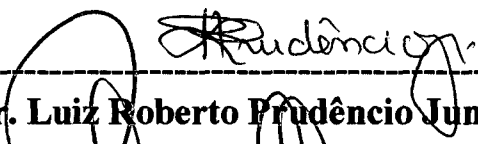
Defesa: 28/02/98

Esse trabalho apresenta de forma sucinta uma visão geral dos concretos de alta resistência e detém-se de forma pormenorizada no estudo da influência dos agregados graúdos na resistência à compressão dos concretos de alta resistência. Com o intuito de conhecer o comportamento dos agregados da grande Florianópolis faz-se um estudo, onde analisa-se a influência da dimensão máxima característica, da mineralogia e da forma dos agregados na resistência à compressão e no consumo de material cimentante. Para isso usa-se quatro diferentes agregados graúdos, três granitos e um diabásio, em três diferentes intervalos granulométricos, de 9,5 a 12,7 mm, de 12,7 a 19,0 mm e de 19,0 mm a 25,0 mm, nas relações água/materiais cimentantes de 0,28, 0,33 e 0,40 e nas idades de 3, 7 e 28 dias. Palavra-chave: Concreto de alta resistência, agregados graúdos, zona de transição.

# **Caracterização dos agregados da Grande Florianópolis e sua utilização em concretos de alta resistência**

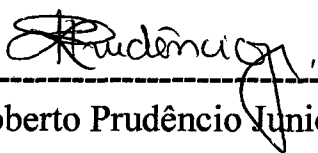
**Mário Arlindo da Silva Paz**


Esta dissertação foi julgada em sua forma final pelo Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina


  
-----  
**Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Junior (Orientador)**

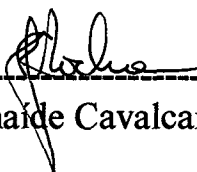
  
-----  
**Prof. PhD. Roberto de Oliveira ( Coordenador do curso)**

## **Banca examinadora**

  
-----  
**Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Junior (Presidente)**

  
-----  
**Profª Dra. Denise C. Coitinho Dalmolin (UFRGS)**

  
-----  
**Prof. PhD. Ivo José Padaratz (UFSC)**

  
-----  
**Profª Dra. Janaide Cavalcanti Rocha (UFSC)**

Ao amor existente em  
todos os planos;  
À luz que dá vida a  
nossas vidas;  
Ao discernimento, fator  
de mutação de nossas  
crenças.

## AGRADECIMENTOS

O autor deseja agradecer ao professor Luiz Roberto Prudêncio Junior pela lucidez, discernimento, tranquilidade e segurança com que orientou este trabalho, até a conclusão desta dissertação.

Ao Departamento de Engenharia Civil da UFSC, por ter proporcionado as condições para desenvolver os trabalhos.

Aos professores do Curso de pós-graduação do Departamento de Engenharia Civil.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná – Unidade de Pato Branco – pela oportunidade concedida e por seu programa de valorização profissional.

Ao colega Dario Dafico, por todas as suas qualidades, meu respeito e admiração, a Silvia Santos pela capacidade e senso de objetividade.

Aos companheiros Antônio Augusto, Aderina, Assis, Flávio, Gihrad e Ildo.

Aos colegas dos Laboratórios de Concreto, Madeiras e Solos: Luiz Henrique e Renato, Paulo e Dida; vocês foram bons companheiros.

Às empresas que foram parceiras no desenvolvimento desta pesquisa; Cimento Itambé, pela doação de mais de 800 kg de cimento; Sika, pela doação dos aditivos plastificantes e super plastificantes; Camargo Corrêa, pela doação da sílica ativa; às pedreiras Pedrita, Saibrita, Sulcaterinense.

À Coordenação do Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) que, pelo seu programa de financiamento, possibilita a existência dos cursos de pós-graduação.

À colega Graziela Peruzzo que auxiliou na separação dos agregados em função da forma.

Ao geólogo Victor Hugo Teixeira que realizou a análise petrográfica das rochas dos agregados graúdos.

À minha mãe, meu filho e a Márcia Formighieri pelo apoio e compreensão durante minha ausência.

**SUMÁRIO****Introdução****1****1. Capítulo 1: Considerações gerais sobre o concreto de alta resistência****9****1.1 CONCRETO, BREVE HISTÓRICO, VANTAGENS E PRINCIPAIS  
DIFERENÇAS DO CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA****9****1.1.1 Conceito****9****1.1.2 Breve histórico****11****1.1.3 Vantagens da utilização do concreto de alta resistência****11****1.1.4 Principais diferenças entre o concreto convencional e concreto de alta resistência****15****1.2 ESTRUTURA DO CONCRETO****16****1.2.1 Macroestrutura****16****1.2.2 Microestrutura****17****1.3 POROSIDADE****20****1.4 A OBTENÇÃO DO CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA****23****1.5 MATERIAIS CONSTITUINTES: Cimento, aditivos e adições minerais****25****1.5.1 Cimento****25****1.5.2 Sílica ativa****29****1.5.3 Aditivos****34**

1.5.4 Agregados	41
<hr/>	
1.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE MÉTODOS DE ENSAIO E CURA EM CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA	42
<hr/>	
1.6.1 Tamanho e forma dos corpos de prova	43
<hr/>	
1.6.2 Método de capeamento	43
<hr/>	
1.6.3 Efeito da cura	45
<hr/>	
<b>2. Capítulo 2: Influência do agregados graúdos nos concretos de alta resistência</b>	<b>47</b>
<hr/>	
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	47
<hr/>	
2.2 A INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS GRAÚDOS NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA	49
<hr/>	
2.3 A IMPORTÂNCIA DA QUALIDADE DOS AGREGADOS GRAÚDOS PARA O EMPREGO NOS CAR	51
<hr/>	
2.4 INFLUÊNCIA DA FORMA E DA TEXTURA DO AGREGADO GRAÚDO NO DESEMPENHO À COMPRESSÃO DOS CAR	53
<hr/>	
2.5 INFLUÊNCIA DA DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA DO AGREGADO GRAÚDO NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CAR	55
<hr/>	
2.6 INFLUÊNCIA DA MINERALOGIA, DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, E DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS ROCHAS DOS AGREGADOS GRAÚDOS NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CAR	58
<hr/>	
<b>3. Capítulo 3: Metodologia</b>	<b>66</b>
<hr/>	
3.1 INTRODUÇÃO	66

**3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS, PROCESSOS E EQUIPAMENTOS**

<b>EMPREGADOS NA PESQUISA</b>	<b>67</b>
3.2.1 Agregados	67
3.2.2 Cimento	67
3.2.3 Relações água/materiais cimentantes	68
3.2.4 Teor de argamassa	68
3.2.5 Trabalhabilidade	68
3.2.6 Idades dos ensaios	68
3.2.7 Número de corpos de prova	68
3.2.8 Teor de sílica ativa	69
3.2.9 Teor de plastificante e superplastificante	69
<b>3.3 LOCALIZAÇÃO DAS PEDREIRAS</b>	<b>69</b>
<b>3.4 NÚMERO E LOCAL DA COLETA DAS AMOSTRAS</b>	<b>70</b>
<b>3.5 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS ROCHAS</b>	<b>71</b>
3.5.1 Ensaios petrográficos	71
<b>3.6 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS GRAÚDOS</b>	<b>73</b>
3.6.1 Introdução	73
3.6.2 Ensaios físicos dos agregados graúdos	74
<b>3.7 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS MIÚDOS</b>	<b>75</b>
3.7.1 Composição granulométrica, conforme tabela 4-4, NBR 7217/87.	75
3.7.2 Massa unitária de acordo com a NBR 7251	76
3.7.3 Massa específica, obedecendo a NBR 9776	76
<b>3.8 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO</b>	<b>76</b>



3.9 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA SÍLICA ATIVA	77
3.10 ADITIVOS PLASTIFICANTES E SUPERPLASTIFICANTES	78
3.11 ÁGUA	78
3.12 SEPARAÇÃO DOS AGREGADOS GRAÚDOS EM FUNÇÃO DA FORMA	79
3.13 INFLUÊNCIA DA FORMA DO AGREGADO GRAÚDO NO DESEMPENHO À COMPRESSÃO DOS CAR	79
3.14 INFLUÊNCIA DA DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA E DO TIPO DE AGREGADO GRAÚDO NO DESEMPENHO À COMPRESSÃO DOS CAR	81
3.15 PRODUÇÃO DAS MISTURAS DE CONCRETO E MÉTODO DE ENSAIO	82
3.15.1 Tipo de betoneira	82
3.15.2 Ordem de colocação dos materiais	82
3.15.3 Tempo de mistura	82
3.15.4 Trabalhabilidade	82
3.15.5 Moldagem dos corpos de prova	83
3.15.6 Adensamento	83
3.15.7 Desmoldagem	83
3.15.8 Cura dos corpos de prova	84
3.15.9 Tipo de capeamento	84
3.15.10 Tipo de prensa	84
3.15.11 Forma de ensaiar e tipos de ruptura	85
<b>4. Apresentação e análise dos resultados</b>	<b>87</b>
4.1 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	87

4.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	95
4.2.1 Introdução	95
4.3 ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	95
4.4 INFLUÊNCIA DA DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA DOS AGREGADOS GRAÚDOS NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	102
4.5 INFLUÊNCIA DA DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA DOS AGREGADOS GRAÚDOS NO CONSUMO DE MATERIAIS CIMENTANTES E NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	108
4.6 INFLUÊNCIA DA MINERALOGIA DOS AGREGADOS GRAÚDOS NO CONSUMO E NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA	113
4.7 INFLUÊNCIA DA FORMA DO AGREGADO GRAÚDO NO DESEMPENHO À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA	120
4.8 ANÁLISE DO DESEMPENHO DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM DIFERENTES AGREGADOS GRAÚDOS MAS, COEFICIENTES DE FORMA MUITO PRÓXIMOS	123
<b>5. Considerações finais</b>	<b>125</b>
<b>6. Sugestões para novos trabalhos</b>	<b>130</b>
<b>7. Referências bibliográficas</b>	<b>131</b>

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 (a) Exsudação interna, MEHTA (1994); (b) Ruptura na zona de transição, MEHTA (1994).....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 1.2 Ruptura do concreto na zona de transição, MORANVILLE, M; REGOURD (1992).....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 1.3 Pasta de cimento Protland, a/c = 0,50; (1) C-S-H fibroso, (2) Ca(OH)<sub>2</sub>, (3) Poro capilar, MORANVILLE, M; REGOURD (1992).....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 1.4 Pasta de cimento com sílica ativa e superplastificante. (1) Ca(OH)<sub>2</sub>, (2) CSH (amorfo), MORANVILLE, M; REGOURD (1992).....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 1.5 Porosidade total e distribuição dos tamanhos dos poros dados através do porosímetro de mercúrio para três concretos com relações água/cimento decrescentes 0,56, 0,27 e 0,21.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 1.6 Resistências de cimento de um mesmo tipo de diferentes indústrias, ACI-363-R (1992).....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 2.1 Gráfico de correlação entre a resistência da rocha mãe e a resistência do concreto.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 3.1 Foto de granito e basalto britados simultaneamente.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 3.2 Figura de granitos heterogêneos.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 3.3 Agregado de diabásio (úmido) classificado como cúbico.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 3.4 Agregado de diabásio (seco) classificado como lamelar.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 3.5 Foto do concreto antes da adição dos aditivos.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 3.6 Foto do concreto depois da adição dos aditivos.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 3.7 Visão parcial da prensa utilizada nos ensaios de resistência à compressão.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 3.8 Concreto em compressão, fissurando-se.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 3.9 Foto com a seqüência do ensaio, rompendo-se.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 3.10 Ruptura transgranular.....</i>	<i>86</i>

<i>Figura 3.11 Rupturas na zona de transição e transgranularmente.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 4.1 Influência do tipo de agregado na evolução da resistência; concretos com agregados de D.M.C=12,7 mm e <math>a/(c+sa)=0,28</math>.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 4.2 Influência do tipo de agregado na evolução da resistência; concretos produzidos com agregados de D.M.C=25,0mm e <math>a/(c+sa)=0,28</math>.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 4.3 Influência da relação água/materiais cimentantes na evolução da resistência.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 4.4 Influência da dimensão máxima característica na evolução da resistência de concretos produzidos com <math>a/(c+sa)=0,28</math> e agregados de diabásio.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 4.5 Influência da dimensão máxima característica na evolução da resistência de concretos produzidos com <math>a/(c+sa) = 0,33</math> e agregados de diabásio.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 4.6 Influência da dimensão máxima característica na resistência à compressão de concretos produzidos com agregados de granito 3, nas diferentes <math>a/(c+sa)</math>, na idade de 28 dias.....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 4.7 Influência da dimensão máxima característica na resistência à compressão de concretos produzidos com agregados de diabásio, nas diferente <math>a/(c+sa)</math>, na idade de 28 dias.....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 4.8 Influência da dimensão máxima característica do agregado graúdo da rocha de granito 1 no consumo de cimento e na resistência à compressão dos CAR.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 4.9 Influência da dimensão máxima característica do agregado graúdo da rocha de granito 2 no consumo de cimento e na resistência à compressão dos CAR.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 4.10 Influência da dimensão máxima característica do agregado graúdo da rocha de granito 3 no consumo de cimento e na resistência à compressão dos CAR.....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 4.11 Influência da dimensão máxima característica do agregado graúdo da rocha de diabásio no consumo de cimento e na resistência à compressão dos CAR.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 4.12 Influência do tipo de agregado na resistência à compressão dos CAR , concretos produzidos com agregados de D.M.C=12,7 mm, na idade de 28 dias.....</i>	<i>114</i>

<i>Figura 4.13 Influência do tipo de agregado graúdo no consumo de material cimentante, concretos produzidos com agregados graúdos de D.M.C=12,7 mm.....</i>	<i>115</i>
<i>Figura 4.14 Influência do tipo de agregado graúdo na resistência à compressão dos CAR, concretos produzidos com agregados de D.M.C= 19,0 mm.....</i>	<i>116</i>
<i>Figura 4.15 Influência do tipo de agregado graúdo no consumo de material cimentante, concretos produzidos com agregados de D.M.C=19,0mm.....</i>	<i>117</i>
<i>Figura 4.16 Influência do tipo de mineralogia do agregado graúdo na resistência à compressão dos CAR, concretos produzidos com agregados de D.M.C= 25,0 mm.....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 4.17 Influência do tipo de agregado graúdo no consumo de material cimentante, concretos produzidos com agregados de D.M.C=25,0mm.....</i>	<i>119</i>
<i>Figura 4.18 Influência da forma do agregado graúdo na resistência à compressão dos CAR, concretos produzidos com agregados de diabásio com D.M.C = 19,0 mm...</i>	<i>121</i>
<i>Figura 4.19 Influência da forma do agregado de granito 3 na resistência à compressão dos CAR, concretos produzidos com agregados de dimensão máxima igual a 19,0 mm.....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 4.20 Influência do tipo de rocha do agregado graúdo na resistência à compressão; agregados com D.M.C=19,0 mm e coeficientes volumétricos bastante próximos.....</i>	<i>124</i>

<b>LISTA DE TABELAS</b>
-------------------------

Tabela 1-1 Calor de hidratação dos principais compostos de cimento, MEHTA (1994).....	29
<i>Tabela 1-1 Quantidade de sílica ativa gerada em função do tipo de liga produzida.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabela 1-3 Dados do uso de aditivos em concretos em alguns países.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 1-4 Análise dos ganhos de resistência à compressão pelo emprego de cura adequada.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabela 2-1 Resultado dos ensaios de resistência à compressão <math>\alpha/(c+ms) = 0,275</math>.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabela 2-2 Propriedades físicas e mecânicas de algumas rochas.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabela 2-3 Resultado dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade de concretos produzidos com diferentes agregados graúdos.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabela 2-4 Relação entre as propriedades das rochas e dos concretos.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabela 2-5 Relações entre as características dos agregados e as características dos concretos.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabela 3-1 Número de amostras de rochas por pedreira investigada.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabela 3-2(a) Resultado dos ensaios físicos dos diferentes agregados graúdos.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabela 3-2(b) Resultado dos ensaios físicos dos diferentes agregados graúdos.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabela 3-3(a) Tabela com os ensaios físicos dos agregados graúdos. Coeficiente volumétrico.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabela 3-3(b) Tabela com os ensaios físicos dos agregados graúdos. Coeficiente volumétrico.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabela 3-4 Resultado dos ensaios químicos de cimento realizados no cimento CP I-S-32, em fevereiro de 1997.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabela 3-5 Resultado dos ensaios físicos do cimento CP I S 32.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabela 3-6 Características físicas da Sílica Ativa Amorfa.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabela 3-7 Composição química da Sílica Ativa Amorfa.....</i>	<i>78</i>

<i>Tabela 3-8 Apresentação esquemática do número de corpos de prova ensaiados na idade de 28 dias e nas diferentes relações água/materiais cimentantes, para a análise da influência da forma.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabela 3-9 Corpos de prova ensaiados utilizando os agregados de granito 1, de granito 2, de granito 3 e de diabásio.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabela 4-1 Resumo das resistências à compressão de concretos produzidos com diferentes agregados graúdos, diferentes dimensões máximas características, diferentes relação água/materiais cimentantes, nas idades de 3, 7 e 28 dias.....</i>	<i>89</i>
<i>Tabela 4-2 Resultado dos ensaios de resistência à compressão dos concretos produzidos com granito 1, com diferentes dimensões máximas características, diferentes relações água/materiais cimentantes, nas idades de 3, 7 e 28 dias.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabela 4-3 Resultado dos ensaios de resistência à compressão dos concretos produzidos com granito 2, com diferentes dimensões máximas características, diferentes relações água/materiais cimentantes, nas idades de 3, 7 e 28 dias.....</i>	<i>91</i>
<i>Tabela 4-4 Resultado dos ensaios de resistência à compressão dos concretos produzidos com granito 3, com diferentes dimensões máximas características, diferentes relações água/materiais cimentantes, nas idades de 3, 7 e 28 dias.....</i>	<i>92</i>
<i>Tabela 4-5 Resultado dos ensaios de resistência à compressão dos concretos produzidos com diabásio, com diferentes dimensões máximas características, diferentes relações água/materiais cimentantes, nas idades de 3, 7 e 28 dias.....</i>	<i>93</i>
<i>Tabela 4-6 Resumo dos resultados dos ensaios de resistência à compressão de concretos produzidos com mesmo tipo de agregado, mas diferentes coeficientes de forma.....</i>	<i>94</i>
<i>Tabela 4-7 Percentagem de resistências alcançadas aos 3 e 7 dias em relação aos 28 dias de idade, nas diferentes relações água/materiais cimentantes.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabela 4-8 Influência da dimensão máxima característica dos agregados graúdos e das relações água/materiais cimentantes na resistência à compressão, na idade de 28 dias.....</i>	<i>103</i>
<i>Tabela 4-9 Resultado das resistências médias à compressão de concretos produzidos com o granito 2, nas diferentes dimensões máximas características e nas diferentes relações água/materiais cimentantes, na idade de 28 dias.....</i>	<i>103</i>
<i>Tabela 4-10 Resistência média dos concretos produzidos com granito 3, com diferentes dimensões máximas características e diferentes relações água/materiais cimentantes, na idade de 28 dias .....</i>	<i>105</i>
<i>Tabela 4-11 Resistência média dos concretos produzidos com diabásio, com diferentes dimensões máximas características e diferentes relações água/materiais cimentantes, na idade de 28 dias .....</i>	<i>106</i>

*Tabela 4-12 Influência da forma do agregado graúdo na resistência à compressão (MPa).....120*

*Tabela 4-13 influência da forma do agregado graúdo na resistência à compressão, (MPa).....122*

*Tabela 4-14 Resultado dos ensaios de resistência à compressão de concretos produzidos com diferentes agregado graúdos mas com coeficientes volumétricos muito próximos.....123*

*Tabela 5-1 Desempenho de concretos produzidos com agregados com coeficiente de forma muito próximos.....127*



**LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS**

$a/(c+sa)$	Relação água/ (cimento + sílica ativa) em massa
$a/c$	Relação água/cimento em massa
ABCP	Associação Brasileira de cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAR	Concreto de alta resistência
$Ca(OH)_2$	Hidróxido de cálcio
CEB	Comité Euro-international du Beton
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
D.M.C	Dimensão máxima característica
EB	Especificação Brasileira
$f_c$	Resistência à compressão do concreto
$f_{ck}$	Resistência característica do concreto, de projeto
FIP	Fédération Internationale de la Précontrainte
sa	Sílica ativa
NBR	Norma Brasileira registrada

## RESUMO

Diferentemente do concreto convencional, no concreto de alta resistência o que define a resistência à compressão do material é a fase agregado ou sua interface. Por questões econômicas, na produção de concreto de alta resistência emprega-se, geralmente, agregados graúdos britados, produzidos regionalmente. A literatura internacional tem mostrados resultados bastante dispersos das propriedades físicas e mecânicas desses materiais, tanto entre diferentes grupos quanto dentro de um mesmo grupo mineralógico; além disso, as correlações entre as propriedades físicas e mecânicas dos agregados graúdos e as propriedades de alta resistência, em alguns casos, são bastante fracas. Isso sugere a necessidade de se realizar estudos específicos com os agregados a serem efetivamente empregados em cada região. Desta forma, o objetivo do presente trabalho é caracterizar os agregados graúdos na Grande Florianópolis e estudar a influência de algumas de suas características na resistência à compressão e no consumo do material cimentante nos CAR. Para tanto, usou-se quatro diferentes agregados de rochas, três granitos e um diabásio, e selecionou-se, para cada um deles, três intervalos granulométricos: de 9,5 a 12,7 mm, de 12,7 a 19,0 mm e de 19,0 a 25,0 mm. Além disso, separou-se os agregados em função da forma em três grupos: lamelar, "in natura" e cúbicos. Para essas análises produziu-se misturas de concretos empregando-se três diferentes relações água/materiais cimentantes (0,40, 0,33 e 0,28), com consistência medida através de ensaio de abatimento, slump-test, de  $8,0 \pm 2,0$  cm. Para cada variável investigada empregou-se quatro corpos de prova. Para o ensaio de resistência à compressão moldaram-se cilindros de 10 x 20 cm, que foram ensaiados nas idades de 3, 7 e 28 dias. Constatou-se significativas variações na resistência à compressão e no consumo de material cimentante quando do emprego dos diferentes agregados graúdos em igualdade de dimensões máximas características e relações água/materiais cimentantes. Observou-se que, em igualdade de consumo de material cimentante, pode-se obter vantagens técnicas através de mudanças na dimensão máxima característica do agregado graúdo ou através de mudanças na mineralogia do agregado ou, ainda, através da melhoria da forma do agregado graúdo. Verificou-se que em determinados agregados, reduções na dimensão máxima característica propiciavam aumento na resistência à compressão e em outros não. Por fim, constatou-se que a forma do

agregado graúdo influencia na resistência à compressão e esta influência é mais significativa nos concretos produzidos com as maiores relações água/materiais cimentantes (0,33 e 0,40).

**ABSTRACT**

In high strength concrete, differently from normal concrete, the weakest phase is the coarse aggregate or its interface. Usually, due to economic issues, coarse aggregate produced regionally is generally used in the production of high strength concrete. The international literature has been showing quite dispersed results of physical and mechanical properties of these materials, not only in different groups but also within the same mineralogical group. Moreover, it has been verified, in some cases, weak correlation between the physical and mechanical properties of coarse aggregate and the properties of high strength concrete. This fact suggests the need to accomplish specific studies on the materials effectively used in each area. Therefore, objective of the present research is to characterize the coarse aggregates produced in the great Florianópolis and to study the influence of some characteristics of them in the strength to the compression and the consumption of cementitious material of high strength concrete (HSC). Hence, it was used four different coarse aggregate of rocks, namely three granites and a diabasic, and for each one of them it was selected three grading intervals: from 9,5 to 12,7 mm; 12,7 to 19,0 mm, and 19,0 to 25,0 mm. Besides, the coarse aggregates were separated according to their shape in the groups: laminate, "in nature" and cubic. For these analyses mixtures of concrete were produced employing three different water/cementitious ratio of 0,40, 0,33 and 0,28. Mixtures of concrete were produced following pre-established criterium of workability, which was measured through consistency tests (slump test). The established values for is workability were from  $8,0 \pm 2,0$  cm. Four examples were used for each investigated variable. These examples were moulded in cylinders of 10 x 20 cm and tested at the age of 3, 7 and 28 days. Significant variations in the resistance to the compression and in the consumption of cementitious material were found when different coarse aggregate in equality of maximum size dimensions and water/cimentitious were employed. It was observed that in equality of cementitious material consumption technical advantages can be obtained through changes in the maximum size of coarse aggregates or through changes in the aggregate mineralogy, or yet, through the improvement in the shape of the coarse aggregate. It was further verified that reductions in the maximum size aggregate in certain coarse aggregate propitiated an increase in the strength to the compression but

not in others. Finally, it was verified that the shape of coarse aggregate influences the resistance to the compression and this influence is more significant in the concrete, which is produced with the largest water/cementitious ratio (0,33 and 0,40).

## Introdução

O avanço tecnológico ocorrido nas últimas décadas possibilitou e viabilizou o surgimento de novos materiais e equipamentos que, em parceria com os já existentes, permitiram elevar os níveis da qualidade dos produtos industrializados. Essa melhoria resultou ou numa redução de custo, ou na melhor relação custo/benefício. Atualmente, devido aos recursos disponíveis (moldagens, microscopia e simulações), é possível produzir materiais otimizados e adequados às principais solicitações a que ficarão submetidos. Essa otimização poderá ter os mais variados enfoques (peso/potência, peso/resistência, custo/vida útil, “design”/custo, custo/manutenção). As metas a serem alcançadas, para a melhor satisfação do consumidor, vão ao encontro do melhor “design”, menor peso, maior vida útil, menor manutenção. Entretanto, em muitos casos, esses quesitos são praticamente incompatíveis e encontrar o ponto de equilíbrio é uma árdua tarefa.

Os tecnólogos do concreto, tendo como meta a satisfação do consumidor, a partir da década de 60 intensificaram seus estudos visando a, principalmente, aumentar a resistência do concreto e diminuir sua parcela de auto-sustentação. Como consequência desse estudo, foi possível edificar a primeira estrutura de concreto de alta resistência em 1965, em Chicago, EUA, na construção das colunas do edifício “Lake Point Tower”, com 70 pavimentos e resistência característica aos 28 dias,  $f_{ck}$ , de 52 MPa (ISAIA 1991).

O concreto sofreu mudanças significativas a partir do surgimento dos aditivos plastificantes, superplastificantes e adições minerais. Com o advento dos plastificantes, que de uma forma geral diminuem a tensão superficial da água, foi possível reduzir o teor de água em aproximadamente 10%; consequentemente, tornou-se relativamente fácil produzir concretos com menores relações água/cimento, na ordem de 0,40, sem que trabalhabilidade fosse alterada. Além disso, na década de 70, com o ingresso dos superplastificantes, a base de melamina (Alemanha) e naftaleno sulfonatos (Japão), que são capazes de reduzir de 20 a 25 % a quantidade de água de mistura, começaram a ser produzidos concretos com relações água/cimento tão baixas quanto 0,30. A partir daí,

ocorreu um enorme salto nos níveis de resistência e as características do concreto mudaram substancialmente. Os cientistas do concreto, com o auxílio da microscopia, puderam conhecer com mais profundidade as propriedades microestruturais da pasta e da zona de transição.

Desde então, tornou-se relativamente fácil produzir concretos com resistência média da ordem de 50 a 70 MPa, o que causou um crescente aumento na utilização dos CAR. As várias razões para essa mudança de comportamento são fundamentadas na grande eficiência representada por vantajosa relação qualidade/custo, estruturas mais esbeltas, com reduzido peso próprio, fundações com menos carga, edifícios mais altos, menor deflexão em edifícios de grande altura, vãos mais longos, maior velocidade de construção e, principalmente, durabilidade mais elevada (ISAIA, 1991).

As aplicações do concreto de alta resistência estão ligadas principalmente à propriedade de resistência à compressão do material. Entretanto, esse concreto possui outras características que podem ser usadas com vantagem, como alta resistência a ataques químicos, abrasão e ciclos de gelo e degelo, entre outras (MEHTA, 1994).

Os concretos de alta resistência são geralmente utilizados em obras de grande porte tais como pontes, edifícios altos e em elementos pré-fabricados.

Para a utilização do concreto de alta resistência em estruturas de concreto armado, é imprescindível conhecimento aprofundado do comportamento mecânico desse material em face das diferentes solicitações. No Brasil, sua utilização é, ainda, relativamente recente e muitos estudos são necessários e indispensáveis. Isso porque as informações provenientes de pesquisas realizadas no exterior necessitam ser ajustadas à realidade brasileira, que adota diferentes processos de produção e uso de materiais com diferentes características, principalmente cimento e aço. Nesse sentido, muitos estudos estão sendo conduzidos em várias instituições de ensino, como cita ALMEIDA (1996).

É compreensível esperar que a norma atual, NBR 6118, que trata do dimensionamento das estruturas de concreto armado, não esteja adequada a tão elevados níveis de resistência, posto que o limite superior da resistência do concreto é convencionado em 40 MPa. Contudo, na medida em que se adquirir maior domínio sobre os processos de

produção e controle, bem como sobre o seu comportamento em diferentes solicitações, haverá consolidação do conhecimento e, conseqüentemente, uma rápida modernização nas normas vigentes, com crescente utilização desse material. O aumento na demanda do concreto de alta resistência fundamentar-se-á, basicamente, na relação custo/benefício/durabilidade, isso porque, para elevados níveis de resistência, tanto a porosidade quanto a permeabilidade do concreto são significativamente diminuídas, reduzindo sobremaneira as possíveis causas de deterioração, manutenção e reparo das estruturas de concreto.

O concreto, a nível de microestrutura, é constituído basicamente de três fases: fase pasta, fase zona de transição pasta/agregado e fase agregado. A qualidade dos concreto de alta resistência é dependente da qualidade individual de cada uma das fases e da sinergia entre as mesmas. Assim, o desempenho do concreto estará limitado pela fase mais fraca, independentes de quão boa sejam as demais fases. Em outras palavras, o concreto romperá sempre no elo mais fraco.

Conforme o FIP/CEB (1990), é possível produzir concretos de alta resistência que excedam a 250 MPa à compressão quando se utiliza como agregado gráúdo bauxita calcinada. Esses valores de resistência nos fornecem uma idéia aproximada da qualidade tanto da matriz quanto da zona de transição. Contudo, para concretos produzidos com agregados convencionais, a fase agregado freqüentemente limita as propriedades mecânicas do concreto. Neles, a máxima resistência à compressão oscila entre 120 e 140 MPa.

Para a produção de concretos de alta resistência, a experiência tem mostrado que a qualidade do agregado é um dos importantes fatores limitadores tanto para obtenção de uma boa trabalhabilidade quanto de uma alta resistência (MEHTA, 1994).

O estudo dos concretos de alta resistência com diferentes agregados gráudos é de grande relevância, pois algumas rochas resistem bem aos processos de britagem e produzem agregados de boa qualidade, com pouca fissuração e com bom índice de forma. Outras têm um comportamento totalmente adverso. Essas alterações podem modificar significativamente a resistência à compressão e/ou consumo de material cimentante.



As propriedades mecânicas dos agregados são bastante variáveis. Além disso, é errôneo admitir que agregados de uma mesma família tenham características semelhantes. Os calcários, por exemplo, possuem resistência que variam de 93 a 241 MPa, enquanto que essa faixa é ainda mais ampla entre os arenitos e oscila de 44 a 240 MPa. Para os granitos e basaltos, esse intervalo oscila de 114 a 377 MPa (NEVILLE, 1997).

Considerando tais oscilações e os diferentes processos de britagem, é de se esperar que concretos produzidos com agregados de uma mesma família apresentem diferentes desempenhos à compressão. Além disso, vários pesquisadores, MEHTA (1990), PEREIRA NETO (1995), BAALBAKI et al. (1991), GIACCIO et al. (1992), entre outros, evidenciaram a influência da mineralogia dos agregados graúdos no concreto de alta resistência.

No Brasil, as rochas mais comumente utilizadas para confecção de agregado para concreto são: basalto, quartzito, granito, calcário, gnaiss e arenito. As qualidades resistentes dessas rochas em estado não alterado e compacto são decrescentes na mesma ordem, sendo que a resistência à compressão está no intervalo de 50 a 450 MPa, a resistência à tração de 50 a 300 MPa, o módulo de elasticidade entre 20 e 100 GPa (RODRIGUES e SANTOS, 1988).

Em uma grande cidade é possível encontrar vários fornecedores de agregados, que extraem a matéria prima de diferentes localidades, e/ou utilizam diferentes equipamentos, ampliando sobremaneira a possibilidade de ocorrer variações nas características dos agregados.

Na grande Florianópolis existem três produtores de brita, e as características físicas e mineralógicas dos mesmos varia amplamente, ocorrendo inclusive algumas peculiaridades, como é o caso da Pedrita Planejamento e Construção Ltda, que brita, em algumas vezes, simultaneamente diabásio e granito, e a Saibrita Mineração e Construção Ltda., que, em uma de suas pedreiras, faz britagem de granitos bastante heterogêneos.

O desconhecimento do desempenho dos diferentes agregados graúdos da região de Florianópolis, granitos e diabásio, no CAR, e a necessidade de informações precisas

quanto aos níveis de resistência e consumo de materiais cimentantes foi a causa propulsora desta pesquisa. Essas informações, no atual momento, são relevantes posto que há um grande potencial de utilização dos CAR e os técnicos estão ávidos para emprega-los em suas construções e/ou pré-moldados.

Embora a maioria dos agregados graúdos de origem granítica apresentem desempenhos satisfatórios para o uso em concreto de alta resistência, poucos estudos foram realizados, nessa área em específico, que forneçam subsídios satisfatórios para definir, priori, qual dos agregados graníticos apresentar melhor desempenho nos CAR.

Concretos produzidos com a mesma pasta, diferentes agregados e dimensões máximas características muito próximas, 10,0 mm e 14,0 mm, apresentam diferenças significativas de desempenho (MEHTA e AICTIN, 1990).

A mineralogia dos agregados é de elevada importância para resistência e elasticidade dos concretos de alta resistência, ao ponto de o FIP/CEB (1990) estabelecer fatores de correção para o módulo de elasticidade em função do tipo de agregado.

Existe, ainda, falta de consenso quanto à dimensão máxima característica do agregado graúdo mais adequada à produção de concreto de alta resistência, que pode ser atribuída aos seguintes fatores: a) a existência, nos agregados, de diferentes níveis de microfissuração (devido às diferentes composições mineralógicas – processos de formação da rocha – e/ou processos de britamento); b) às diferentes composições granulométricas; c) aos diferentes índices de forma; d) às diferentes interações químicas ou mecânicas entre os agregados e a pasta, ou seja, na zona de transição. Por isso, para GJORV (1994), a dimensão máxima característica do agregado graúdo, para a produção de concretos de alta resistência, deve oscilar de 10 a 14 mm. Já para MEHTA e MONTEIRO (1994) esse valor pode chegar a 19 mm e para ACI 363R (1992) e FIP/CEB (1990), a dimensão máxima característica pode ser de até 25 mm.

Em contraposição, o aumento na dimensão máxima característica do agregado graúdo pode alterar a demanda de água de mistura e provocar redução na relação água/cimento e otimizar a qualidade tanto da zona de transição quanto da matriz e ampliar a

resistência final do concreto ou, em se mantendo a mesma relação água/cimento, reduzir o consumo de material cimentante (ALMEIDA, 1994).

A forma do agregado gráudo pode afetar, além da demanda de água da mistura, a trabalhabilidade, as condições de adensamento e a espessura da zona de transição, devido ao aumento da exsudação interna. Dependendo das relações água/cimento que se trabalhe, é possível constatar significativas variações no consumo de material cimentante. Se a forma do agregado gráudo é, potencialmente, capaz de alterar as relações de consumo, resistência trabalhabilidade, é importante que se verifique onde ela incide com mais veemência.

Diante desse panorama, a presente pesquisa tem como objetivo geral verificar o desempenho à compressão dos concretos de alta resistência produzidos com diferentes agregados gráudos (todos foram procedentes da grande Florianópolis), com relações água/materiais cimentantes iguais a 0,28, 0,33 e 0,40 para que possam servir como parâmetros aos engenheiros, arquitetos e técnicos envolvidos com a tecnologia do CAR, além de servir como base às pesquisas posteriores. Como objetivos específicos, o trabalho verifica a evolução de resistência dos concretos produzidos com diferentes relações água/materiais cimentantes, nas idades de 3, 7 e 28 dias; o desempenho dos agregados gráudos com diferentes dimensões máximas características, 25,0 mm, 19,0 mm e 12,7 mm e estabelece relações entre consumo de cimento e resistência à compressão para cada uma das dimensões máximas características e agregados empregados. Nesta análise utilizam-se três diferentes agregados graníticos, provenientes de diferentes pedreiras, denominados por granito “1”, granito “2” e granito “3” e um agregado de diabásio. É ainda objetivo específico verificar a influência da forma dos agregados gráudos na trabalhabilidade, no consumo de cimento e na resistência à compressão dos CAR.

Para padronizar os experimentos, adotou-se como medida de trabalhabilidade, o ensaio de consistência, slump-test, e fixou-se o abatimento de  $80 \pm 20$  mm.

Para analisar o comportamento de cada uma das variáveis investigadas, ensaiou-se quatro corpos de prova, dos quais apenas os dois que apresentaram maiores resistências foram considerados.

A presente dissertação inicia com a Introdução, que pretende mostrar o problema gerador da pesquisa, evidenciar sua importância, definir objetivos gerais e específicos, caracterizar as variáveis investigadas e descrever, sucintamente, as constantes utilizadas.

No Capítulo 1, faz-se considerações gerais sobre o concreto de alta resistência, enfatiza-se a elasticidade do conceito, apresenta-se um breve histórico dos CAR e evidencia-se as vantagens de sua utilização. Além disso, ressaltam-se as principais diferenças entre o concreto convencional e concreto de alta resistência, principalmente no que tange às propriedades do concreto fresco e endurecido e mostra-se, sucintamente, os aspectos microestruturais. Trata-se, outrossim, dos materiais constituintes do concreto de alta resistência: cimentos, sílica ativa, aditivos (plastificantes e superplastificantes) e agregados miúdos e graúdos, e finaliza-se com as considerações acerca dos métodos de ensaios, abordando-se, especificamente, os métodos de capeamento e condições de cura.

No Capítulo 2, trata-se da influência dos agregados graúdos no desempenho à compressão dos concretos de alta resistência, ressaltam-se as variações de resistência à compressão em concretos produzidos com agregados de diferentes mineralogias; e chama-se a atenção para as possíveis diferenças de resistência em agregados de uma mesma família. Além disso, analisa-se tanto a influência dos agregados graúdos quanto a influência da dimensão máxima característica dos agregados graúdos no consumo de cimento e na resistência à compressão. Evidencia-se, outrossim, o fato de que, para determinados níveis de resistência, são infrutíferas as alterações no consumo de cimento, pois o concreto rompe sem que os incrementos significativos de resistência ocorram. E, finalmente, levanta-se a hipótese de que a forma do agregado afeta o consumo e a resistência dos CAR.

No Capítulo 3, descreve-se a metodologia empregada no desenvolvimento da pesquisa, a qual parte desde a coleta das amostras, classificação granulométrica dos agregados, armazenamento, separação dos agregados em função da forma, armazenamento e produção de várias misturas de concreto. Trata-se, ainda, do tipo de cura adotada, do capeamento empregado e do ensaio de resistência à compressão.

No Capítulo 4, apresenta-se o resumo dos resultados dos ensaios de resistência à compressão dos diferentes agregados graúdos, nas diferentes idades, dimensões máximas características e diferentes relações água/materiais cimentantes. Apresenta-se os resultados dos fatores das resistências dos granitos e do diabásio na forma lamelar e na forma cúbica. A seguir, faz-se uma análise dos resultados verificando a influência da mineralogia do agregado na resistência à compressão e a influência da dimensão máxima característica na resistência e no consumo de cimento. Finaliza-se verificando o efeito da forma dos agregados no consumo e na resistência.

No Capítulo 5, faz-se as considerações finais. Finalmente, no Capítulo 6, sugere-se outros temas de pesquisa.

## **Capítulo 1– Considerações gerais sobre o concreto de alta resistência**

### **1.1 Conceito, breve histórico, vantagens e principais diferenças do concreto de alta resistência**

#### **1.1.1 Conceito**

O conceito de concreto de alta resistência é relativo no tempo e no espaço, posto que tem como base uma determinada resistência referencial. Assim, em regiões com elevada tecnologia, concretos com resistência na ordem de 50 ou 60 MPa são produzidos em usinas de concreto pré-misturado. Para esses locais, serão considerados concretos de alta resistência aqueles que possuem de 70 a 100 MPa; já em localidades com menor arrojo tecnológico, onde a máxima resistência comercializada gira em torno dos 25 MPa, concretos de 60 MPa ou mais serão considerados de alta resistência (ISAIA, 1991).

SHEEHAN (1991), (Apud GOMES, 1995) conceituam concreto de alta resistência como sendo simplesmente um concreto que alcança resistência à compressão maior do que aquelas típicas dos concretos de uma determinada região.

O termo “concreto de alta resistência” é bastante dinâmico, tanto que, em 1950, concreto com resistência à compressão de 32 MPa era considerado de alta resistência. Já nos anos 60 as resistências oscilavam entre 41 e 52 MPa, e na década de 70, com a introdução no uso de superplastificantes e da microssilica, tornou-se relativamente fácil produzir concretos pré-misturados com resistência da ordem de 60 MPa. Atualmente resistências de projeto de 80 a 100 MPa estão sendo examinadas para aplicação comercial em construções nos Estados Unidos (CEB/FIP, 1990). Até mesmo resistências de 138 MPa já foram utilizadas em edificações, ACI-363.R-92 (1992).

Essa dinâmica está intimamente relacionada com a capacidade dos tecnologistas de produzirem concretos com resistências cada vez mais elevadas. Esses avanços ocorreram graças as constantes investigações ocorridas nessa área da engenharia na última década.

PLISKIN (1992), Apud (GOMES, 1995), classificou os concretos em 4 classes – com resistências características à compressão ( $f_{ck}$ ) na idade de 28 dias medidas em corpos de prova de 16 X 32 cm, de acordo com o código Francês (BAEL), a saber:

- concreto convencional: de 20 MPa até 50,0 MPa;
- concreto de alta resistência: de 50,0 até 100,0 MPa – com ou sem materiais ultra finos, contendo cimentos de alta resistência com consumo de 400 a 450 Kg/m<sup>3</sup>, com superplastificantes (necessários para manter a relação água/cimento entre 0,35 e 0,40) e com agregados comuns;
- concreto com ultra-resistência: de 100,0 até 150,0 MPa – todos os componentes com alta qualidade, relação entre 0,20 e 0,35, alta dosagem de superplastificante, uso de materiais ultra finos (sílica ativa), uso de agregados com dimensão máxima de 10 a 12 mm, com alta resistência e módulo de elasticidade não tão diferente daquele da pasta de cimento, para minimizar a diferença de deformações entre ambos;
- concreto excepcional: resistência à compressão maior que 150 MPa; é obtido, até o momento, apenas em laboratórios.

A ABNT publicou, em 1992, a modificação da norma NBR 8953 (1992) de classificação do concreto para fins estruturais por grupos de resistência, onde passou a incluir uma classe especial de concretos acima de 50 MPa. Para esses concretos, um grupo de trabalho vem tentando produzir um texto base, estruturado em experiências nacionais e internacionais, que forneçam os novos parâmetros para o dimensionamento das estruturas de concreto armado.

Para fins desta pesquisa, adota-se como definição de concreto de alta resistência a mesma adotada na normalização nacional, ou seja: concretos com resistência característica à compressão maior ou igual a 50 MPa.

### **1.1.2 Breve histórico**

Há referencia ao uso de concreto de alta resistência, no ano de 1929, apresentando resistência de 28 MPa (PEREIRA NETO, 1995).

O Lake Point Tower em Chicago, construído em 1968, tinha colunas de concreto de 52 MPa. As colunas inferiores do Water Tower Place em Chicago, construído de 1973 a 1975, foram produzidas em concreto com resistência de projeto de 62 MPa. A resistência de projeto de todas as colunas do Interfirst Plaza em Dallas, construído em 1983, era de 69 MPa. Já em 1989, o 44 Storey Pacific First Center, em Seattle, foi construído com colunas de 115 MPa.

No Brasil, em 1967, foi empregado concreto com 45 MPa e consumo de cimento de 565 Kg/m<sup>3</sup> na construção do Edifício Trianon do Museu de Arte Assis Chateaubriand, em São Paulo (PINTO, 1977). Na década de 80, foi empregado concreto com resistência característica de 60 MPa na construção da estrutura principal do edifício do CNEC-São Paulo (CAMERATO, 1988), Aup (PEREIRA NETO, 1994). No início da década de 90 foi utilizado no prédio dos Plenários, em Brasília, concreto com resistência de 60 MPa (SILVA, 1996). Em 1992, na Bahia, foi iniciada a construção do Centro Empresarial Previnor, onde se utilizou concreto com fck de 60 MPa (SILVA FILHO, 1996).

### **1.1.3 Vantagens da utilização do concreto de alta resistência**

A utilização desse material de construção nos últimos 10 ou 20 anos tem sido ampliada para os mais diversos tipos de estruturas, como por exemplo pavimentações, elementos pré-fabricados, edifícios altos, pontes, estruturas marítimas, recuperação e reforço estrutural. Esse emprego crescente é justificado pelo seu potencial como material de construção, que pode se situar dentro de três categorias, (GOMES, 1995), a saber:



**I. Propriedades que beneficiam o processo de construção:**

- alta consistência e coesividade;
- ausência e exsudação;
- baixa segregação;
- facilidade de lançamento.

Essas propriedades podem aumentar a produtividade e diminuir os custos de transporte, lançamento e adensamento, principalmente em estruturas densamente armadas, ou membros estruturais de difícil acesso aos vibradores. É necessário, entretanto, considerar a necessidade de que o concreto possua elevada trabalhabilidade para que essas vantagens possam ser efetivadas.

**II. Propriedades Mecânicas:**

- maior aderência a um concreto já endurecido;
- maior aderência concreto-aço;
- alta resistência inicial;
- elevado módulo de elasticidade;
- alta resistência à tração;
- alta resistência à abrasão;
- alta resistência aos ciclos de gelo-degelo.

**III. Propriedades relacionadas com a durabilidade:**

- maior proteção contra a corrosão;
- alta resistência aos ataques químicos (cloretos e sulfatos);
- baixa porosidade;
- baixa permeabilidade.

Essa redução de porosidade e permeabilidade dificulta a penetração de cloretos e/ou sulfatos, os quais são responsáveis pela corrosão das estruturas de concreto armado. Essa corrosão gera volumosos custos de manutenção, que chegam a atingir, anualmente, a casa dos 4,0 % do produto nacional bruto (PNB) (FERRARI,1995), de forma que as vantagens da utilização dos CAR tornam-se mais evidentes à medida em que se consideram os aspectos da vida útil e manutibilidade.

Outras vantagens dos concretos de alta resistência podem ainda serem citadas, resumidamente:

- são produzidos, na maioria das vezes, com os mesmos materiais e equipamentos utilizados na tecnologia do concreto convencional;
- possuem melhor relação custo/benefício/durabilidade/manutibilidade;
- são materiais que demandam menor consumo energético quando comparado ao aço;
- em pontes, permite o aumento de vãos livres;
- possibilita a utilização de resíduos industriais – sílica ativa, cinza de casca de arroz, cinza volante, escória de alto forno, etc.- , com significativos benefícios ecológicos, energéticos e econômicos;
- os materiais empregados estão disponíveis na grande maioria das localidades;

- os pilares inferiores de edifícios altos recebem cargas consideráveis. As grandes seções transversais que seriam necessárias para suportar esses esforços, de acordo com a solução tradicional, podem ser reduzidas sem que seja necessário alterar as taxas de armaduras. Estas reduções possibilitam ganho de área útil nos andares inferiores. Através de alteração do  $f_{ck}$  de projeto de 15 MPa para 40 MPa, é possível obter reduções de aproximadamente 36 % na seção transversal dos pilares e reduções na ordem de 50 % na passagem de 20 MPa para 60 MPa;
- velocidade de construção: O CONCRETE INTERNATIONAL (1982), Apud ISAIA (1991), cita a construção do 101 Park Avenue concebido em concreto armado com 50 pavimentos, dos quais os 44 andares superiores foram executados em 24 semanas, na razão de um pavimento a cada três dias úteis;
- COLACO, (1985), Apud ISAIA (1991), ao descrever o uso do CAR (52 MPa) na Construção do Edifício Texas Commerce Plaza, em Houston, com 75 pavimentos, no período entre 1978 e 1981, afirma que as vantagens desse material se manifestam na maior rigidez da estrutura e menor deflexão no topo, maior conforto aos usuários pelo maior amortecimento das oscilações devidas ao vento, menor deformação axial diferencial das colunas internas em relação às externas e, principalmente, maior rapidez de execução, na razão de dois pavimentos por semana, velocidade semelhante às construções de aço;
- MEHTA (1994) afirma que a velocidade de construção é da maior importância na era de grandes taxas de juros; portanto, Ter um edifício concluído e ocupado, no menor prazo possível, por locatários pagando aluguel, é importante para o incorporador;
- apresenta reduzida permeabilidade e elevada resistência a ambientes agressivos, o que lhe garante o emprego em reatores nucleares e em plataformas marítimas (LARRARD et al., 1990; RONNEBERG e SANDVIK, 1990; Apud DALMOLIN, 1995);

- sua alta resistência à abrasão lhe confere atributos para a utilização em pavimentos rodoviários, (MEHTA, 1994) e em vertedouros de usinas hidrelétricas (LEITE, et al. 1996);
- quando se utiliza sílica ativa na fabricação do CAR, ocorre uma significativa melhoria no desempenho do concreto. Essa melhoria é sentida através do aumento de resistência e durabilidade que se obtém graças ao refino de grão e de poro;
- NGAD, SLATE e NILSON, (1991), Apud ISAIA (1991), estudaram a microfissuração progressiva do concreto em compressão uniaxial, na faixa de 30 a 75 MPa, e concluíram que a microfissuração desses concretos, devido à retração, tanto em cargas de curta quanto de longa duração, é significativamente menor do que em concretos convencionais, explicando em parte a menor fluência nos CAR. Além disso, conforme SMADI E SLATE (1989), Apud ISAIA (1991), para os mesmos níveis de tensão, os concretos de alta resistência apresentam menor quantidade de fissuras;
- a retração e a fluência dos CAR é inferior à do concreto normal, isso porque, naqueles, a quantidade de água capilar e de água absorvida é muito menor que nos concretos convencionais; além disso, o deslocamento dessa água até o exterior é enormemente dificultado pelo reduzido tamanho dos poros e, principalmente, pela descontinuidade dos mesmos.

#### **1.1.4 Principais diferenças entre concreto convencional e concreto de alta resistência**

- a) Nos concretos de alta resistência, além dos materiais normalmente utilizados na tecnologia do concreto convencional, empregam-se aditivos plastificantes, superplastificantes, e adições minerais altamente pozolânicas (sílica ativa);
- b) Diferenças quanto aos procedimentos adotados na seleção dos materiais, (cimento, agregados miúdos e graúdos, aditivos e adições minerais): deve-se encontrar a melhor compatibilidade entre aditivo-aditivo e cimento-aditivo, optar por cimentos

com baixa atividade reológica (atividade reológica do cimento é a velocidade com que o cimento consome as moléculas de água durante os primeiros momentos após a mistura); elevada uniformidade; baixo calor de hidratação e com pequenas alterações no teor de  $C_3A$ , sulfatos e álcalis equivalente, uma vez que essas características modificam substancialmente a atividade reológica do cimento. Deve-se empregar agregados graúdos com dimensão máxima característica inferior a 25,0 mm, isentos de microfissuras e de inclusões minerais, com baixa porosidade e com módulo de elasticidade próximo ao da argamassa; utilizar agregados miúdos com forma arredondada e elevado módulo de finura. Pequenas variações na distribuição granulométrica da sílica ativa, do cimento, da areia ou dos agregados graúdos podem gerar significativas mudanças nos níveis de resistência dos CAR;

- c) Diferenças quanto às condições dos materiais antes da mistura: Os materiais componentes dos CAR, antes da mistura, devem ser mantidos à temperatura mais baixa possível, pois isso reduz a perda da trabalhabilidade; os agregados miúdos e graúdos necessitam estar secos e/ou ter-se o exato conhecimento do teor de umidade, pois oscilações na ordem de 0,5 % na unidade dos agregados modifica substancialmente a relação água/cimento, comprometendo a qualidade final dos CAR;
- d) A mudança no tipo de betoneira e/ou na sequência de mistura pode acarretar mudanças significativas na trabalhabilidade e/ou na resistência dos CAR;
- e) Os CAR, devido à elevada coesão – propiciada pelo elevado teor de finos – exigem maior energia, tanto para obtenção de uma mistura homogênea, quanto para o deslocamento e/ou adensamento.

## 1.2 Estrutura do concreto

### 1.2.1 Macroestrutura

Macroestrutura é a estrutura grosseira de um material, visível a olho nu. Na macroestrutura do concreto duas fases são perfeitamente distintas: a dos agregados, com

suas diferentes formas, tamanhos e mineralogias, e a do meio ligante (matriz de cimento).

### **1.2.2 Microestrutura**

O termo microestrutura é empregado para a porção aumentada microscopicamente de uma macroestrutura.

A nível microscópico percebe-se que, além da fase agregado e da fase pasta, existe uma outra fase, entre o agregado e a matriz, que é denominada zona de transição.

Cada uma dessas macrofases é constituídas de múltiplas fases. O agregado, por exemplo, miúdo ou gráudo, pode conter vários minerais, diferentes graus de porosidade e microfissuração. A matriz de pasta e a zona de transição são também constituídas de várias microfases. Estas microfases possuem uma distribuição heterogênea, de diferentes tipos e quantidades de fases sólidas, poros e microfissuras, além da possibilidade de ocorrerem mudanças estruturais ao longo do tempo.

#### **1.2.2.1 Microestrutura do concreto convencional**

No concreto de resistência normal, a zona de transição ao redor do agregado possui uma espessura de 20 a 100  $\mu\text{m}$ , e uma microestrutura bastante diferente da matriz de pasta. Essa zona de transição é de inferior resistência de ligação entre o agregado e a pasta de cimento. Isso é tipicamente caracterizado pelos seguintes elementos chaves:

- a) a zona de transição é mais rica em hidróxido de cálcio e etringita que a matriz, e os hidróxidos de cálcio estão orientados. Uma auréola, com elevada quantidade de hidróxido de cálcio, pode ser observada ao redor dos agregados;
- b) a porosidade na zona de transição é maior que na matriz de pasta, e é possível observar um gradiente na porosidade que tende a reduzir à medida em que se distancia da superfície do agregado (GJORV, 1994).

No concreto de resistência normal, a quantidade de água de mistura, necessária a uma dada trabalhabilidade, é bastante elevada e em consequência disto é comum ocorrer, ao redor do agregado, exsudação interna. Assim, essa zona possui maior relação água/materiais cimentantes que a matriz e, portanto, maior porosidade.

Sob o ponto de vista mecânico, a pasta de cimento pode ser considerada como um meio anisotrópico. Já a auréola de transição é uma zona fortemente anisotrópica. Nessa zona interfacial forma-se uma concentração de tensões sempre que o concreto é submetido a ações mecânicas, o que faz com que seja o local do surgimento das primeiras fissuras (PAULON, 1991).

As figuras 1.1(a) e (b) e a figura 1.2 evidenciam a exsudação interna que normalmente ocorre nos concretos convencionais e a ruptura na zona de transição.

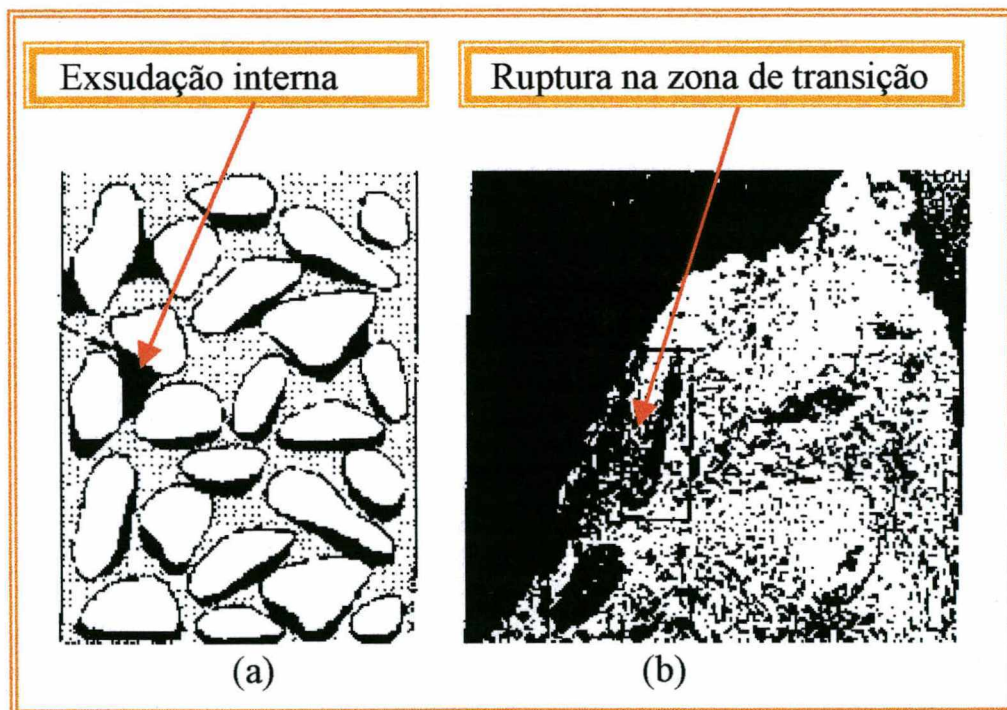


Figura 1-1 (a) exsudação interna, MEHTA (1994); (b) Ruptura na zona de transição MEHTA (1994)



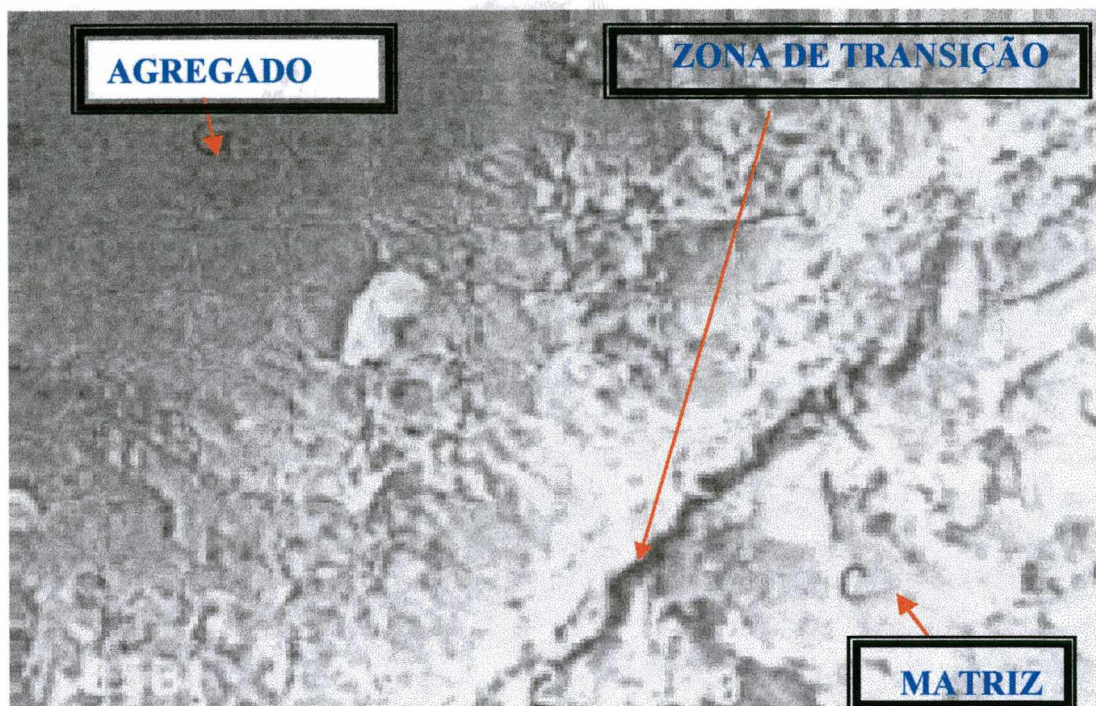


Figura 1.2 Ruptura do concreto na zona de transição (MORANVILLE, M; REGOURD, 1992)

A figura 1.3 apresenta uma foto dos cristais de fibrosos do C-S-H (1), os cristais  $\text{Ca(OH)}_2$  (2) e o poro capilar de uma pasta de cimento Portland com relação água/cimento igual a 0,50, revelando o quanto é anisotrópica esta zona de transição.

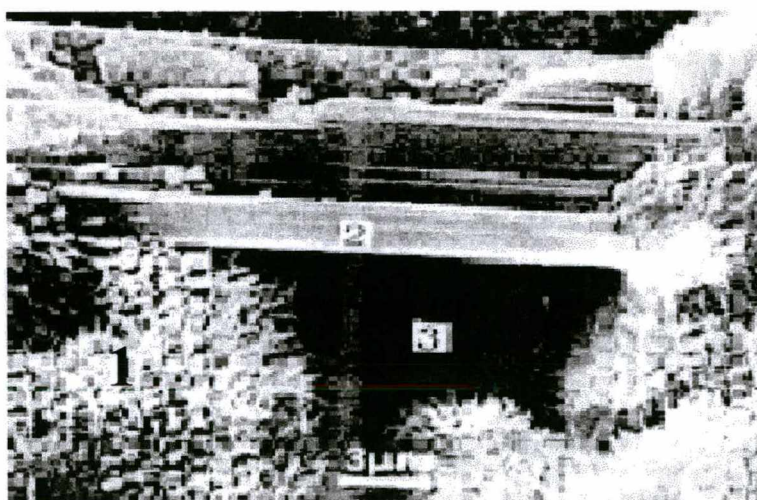


Figura 1-3 Pasta de cimento Portland,  $a/c = 0,50$ ; (1) C-S-H fibroso, (2)  $\text{Ca(OH)}_2$ , (3) Poro capilar, MORANVILLE, M; REGOURD (1992).



### 1.2.2.2 Microestrutura dos concretos de alta resistência

Quando o cimento Portland é combinado com as partículas ultra finas da sílica ativa em baixas relações água/materiais cimentantes, mudanças consideráveis ocorrem na microestrutura da zona de transição. Essa microestrutura consiste, principalmente, de hidróxidos de cálcio com geometria cristalina pouco definida e de uma matriz de pasta com C-S-H amorfo, formando uma matriz mais densa, com baixa porosidade. Com a sílica ativa, grande parte do hidróxido de cálcio é transformado em silicato de cálcio hidratado, enquanto a quantidade remanescente tende a formar cristais de hidróxido de cálcio menores do que os formados com pasta de cimento puro.

A figura 1.4 Apresenta a fraca cristalinidade do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e a forma amorfa do C-S-H.

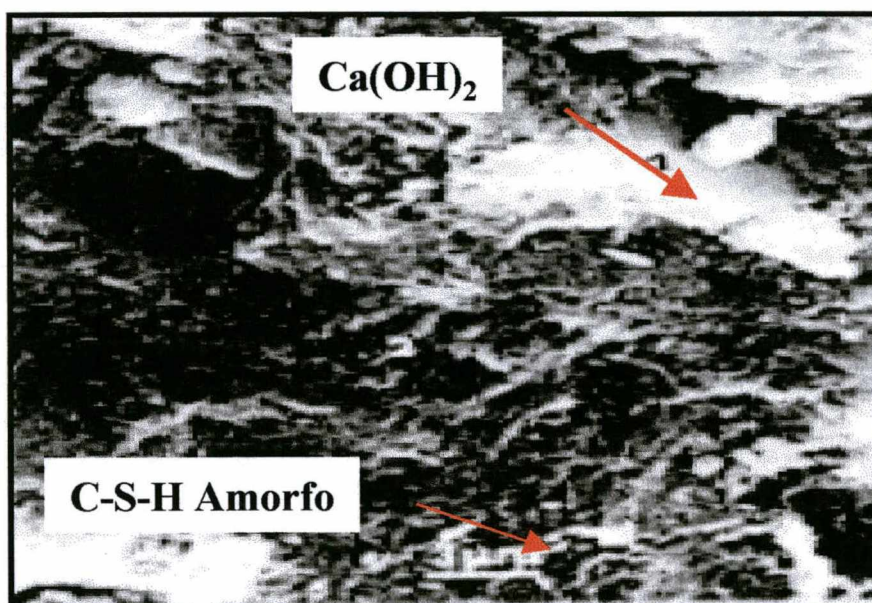


Figura 1-4 Pasta de cimento com sílica ativa e superplastificantes. (1)  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , (2) C-S-H (amorfo), (MORANVILLE, M; REGOURD, 1992).

## 1.3 Porosidade

Nos materiais cerâmicos, a resistência e a fratura dependem mais dos componentes extremos que dos médios. Dentro dessa ótica, a fratura à compressão nos concretos ocorre dentro do princípio do elo mais fraco. Por isso, além do número, das dimensões e

da forma dos poros, sua disposição espacial ou local de concentração é o fator que mais influi na falha (RICE, 1977, Apud ISAIA, 1991).

A porosidade do concreto é uma variável que depende da porosidade do agregado, da porosidade da pasta de cimento endurecida e da porosidade da zona de transição. A zona de transição, face à exsudação interna – que ocorre em concretos pouco coesos e/ou de elevada trabalhabilidade – é local propício à difusão de íons, e à formação de grandes cristais na forma de prismas orientados de hidróxido de cálcio, os quais, face a sua aleatoriedade, formam uma camada bastante porosa.

A porosidade do concreto pode ser ainda resultante do aprisionamento e/ou incorporação de ar, dos vazios capilares e dos vazios da pasta de cimento endurecida. Os vazios capilares representam o espaço não preenchido pelos sólidos da pasta. São formados pela saída da água de mistura em excesso, que não participou das reações de hidratação. Assim, a porosidade capilar será tanto maior, quanto maior for a quantidade de água adicionada à mistura e quanto menor for o grau de hidratação. Os poros do gel são os espaços vazios existentes entre os produtos da hidratação e ocupam cerca de 26 % do volume total do gel, considerando-se como sólido o material remanescente após a secagem (CAMPITELI, 1987).

A porosidade influencia na resistência, na permeabilidade, nas mudanças de volume e no módulo de deformação. A porosidade da pasta de cimento endurecida é influenciada pelo teor, tipo, qualidade e quantidade de adições minerais, pela reação água/materiais cimentantes e pelo grau de hidratação.

Para MEHTA (1994), não é a porosidade total, mas a distribuição do tamanho dos poros que controla efetivamente a resistência, a permeabilidade e as variações de volume de pasta endurecida. A distribuição do tamanho do poros é afetada pela relação água/materiais cimentantes e pelo grau de hidratação do cimento. Os vazios de ar aprisionado – com até 3 mm – vazios de ar incorporado – 50 a 200  $\mu\text{m}$  – e os poros maiores que 50  $\mu\text{m}$  influenciam principalmente na resistência à compressão e na permeabilidade; os poros pequenos influenciam mais na retração por secagem e na fluência. São nesses pequenos poros que a água fica, ou absorvido, ou entre as camadas do C-S-H. Quando a umidade relativa do ar é menor ou igual a 30 %, grande parte da



água absorvida é perdida, sendo uma das principais causadoras da retração por secagem. Já a água presentes nas camadas do C-S-H só é perdida quando a umidade relativa do ar é inferior a 11 % ou quando a estrutura é submetida a carregamento constante e à fluência.

Para análise da porosidade do concreto pode-se utilizar vários métodos, contudo, um dos métodos mais utilizados é o porosímetro de mercúrio, com o qual é possível verificar quanto o material é poroso e como se distribuem os poros em seu interior.

Quando se utilizou esse método para analisar a porosidade de um concreto de alta resistência com sílica ativa e a de um concreto de resistência convencional, constatou-se que o volume total de mercúrio, introduzido sob uma pressão de 150 MPa, foi duas vezes maior no concreto convencional que no concreto de alta resistência com sílica ativa (MORANVILLE, M; e REGOURD, 1992).

Os dois fatores responsáveis por essa redução de porosidade são a presença de sílica ativa atuando como um filler pozolânico e o uso de superplastificantes que reduzem as relações água/materiais cimentantes de 0,56 a 0,21.

Os gráficos da figura 1.5 representam a distribuição do tamanho dos poros e a porosidade total de três diferentes concretos com relação água/cimento decrescentes: 0,56, 0,27 e 0,21 (MORANVILLE, M; e REGOURD, 1992).

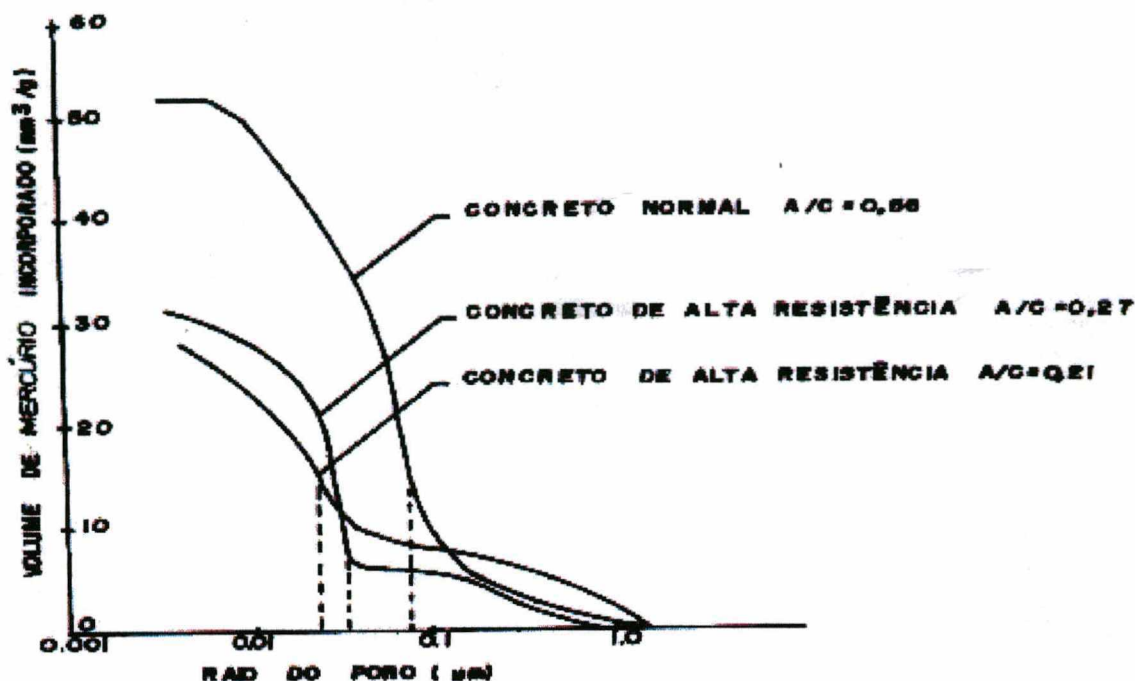


Figura 1-5 Porosidade total e distribuição dos tamanhos dos poros dados através do porosímetro de mercúrio para três concretos com a/c decrescentes: 0,56, 0,27 e 0,21

#### 1.4 Obtenção do concreto de alta resistência

A resistência à compressão do concreto é uma característica que resulta da qualidade de cada uma das fases (agregado, matriz e zona de transição) e da sinergia entre as mesmas. Portanto, se o objetivo é melhorar a resistência do concreto, é imprescindível pensar de forma sistêmica, ou seja, otimizar ao máximo o desempenho de cada uma das fases envolvidas, bem como a interação entre elas.

Para AÍTCIN (1994), para aumentar a resistência do concreto é necessário:

- reduzir tanto quanto possível, no concreto, a relação água/cimento, através da redução da quantidade de água com o emprego de elevadas doses de superplastificantes;
- selecionar a mais eficiente combinação (entre cimento, aditivos e adições minerais) em termos de reologia, perda de abatimento e resistência;

- c) usar os melhores agregados sob o ponto de vista de resistência e aderência de forma a retardar, tanto quanto possível, a propagação das fissuras críticas, quando o concreto estiver submetido ao aumento de cargas.

Contudo, faz-se necessário ressaltar vários outros aspectos quanto à obtenção de um concreto de alta resistência, tais como:

- a) utilizar cimentos com a melhor proporção entre  $C_2S/C_3S$ , aproximadamente 0,54, elevadas taxas de  $C_2S$  e  $C_3S$ , com baixo teor de  $C_3A$  e álcalis equivalente, com distribuição granulométrica que demande a menor quantidade de água de mistura (MEHTA, 1990, GJORV, 1994);
- b) otimizar a qualidade da pasta através de adequado empacotamento e sinergia entre materiais cimentantes e/ou pozolânicos, o que resultará em melhor quantidade de água de amassamento e mais elevados desempenhos à compressão (LARRARD, 1994);
- c) utilizar agregados miúdos de forma tão esférica quanto possível, isento de impurezas, com elevado módulo de finura de aproximadamente 3 (ACI-363-R, 1992);
- d) manter os materiais componentes à temperatura mais baixa possível (embora acima de  $0^{\circ}C$ ), parâmetro esse que influencia, entre outras características, o consumo de água e a velocidade de perda de trabalhabilidade (ALMEIDA, 1995);
- e) usar cuidadosa metodologia na adição dos aditivos, com rigoroso controle na medição, descarga e cronometragem na seqüência de mistura (ACI-212, 1993);
- f) escolher apropriadamente o equipamento de mistura ou betoneira. Em alguns casos pode ser conveniente o emprego de misturadores de alta velocidade com elevada energia de mistura, os quais podem incrementar a resistência do concreto (SAEED, 1995);



- g) definir a ordem mais adequada de colocação dos materiais na betoneira;
- h) planejar as tarefas de transporte, de lançamento e adensamento, para que sejam evitados e/ou reduzidos ao máximo os tempos de ociosidade durante a concretagem (ALMEIDA, 1995);
- i) empregar adensamento enérgico, com vibradores de imersão com frequência na ordem de 6.000 ciclos por segundo ou mais, para propiciar um adensamento mais efetivo na mistura (ALMEIDA, 1995);
- j) manter cuidadoso e adequado processo de cura.

## **1.5 Materiais constituintes: Cimento, aditivos e adições minerais**

### **1.5.1 Cimento**

O cimento Portland é um cimento hidráulico que endurece através da interação com a água e forma um componente resistente a água quando endurecido. Em comparação com os aglomerantes não hidráulicos, tais como o gesso e o cal que não resistem a água após o endurecimento, ele é altamente durável e produz alta resistência em concretos e argamassas. É feito com cristais minerais finamente pulverizados, compostos principalmente de silicatos de cálcio e de alumínio. A massa específica dos cimentos varia conforme o tipo e a classe. Quando o cimento é simples sua massa específica pode variar de 3,12 a 3,16 Kg/dm<sup>3</sup>. Já quando é composto esse intervalo amplia grandemente. A finura medida através do tamanho da partícula varia de 10 a 50 microns (NAWY, 1996).

A resistência da pasta de cimento é resultante do processo de hidratação. O processo químico resulta da recristalização dos cristais e formação de cristais interligados produzindo um gel de cimento que apresenta elevada resistência quando endurecido.

Para atender certas necessidades da indústria da construção, não satisfeitas pelos cimentos Portland comuns, foram desenvolvidos cimentos especiais, como os cimentos pozolânicos, cimentos de escória de alto forno, cimentos expansivos, cimentos de pega endurecimento rápidos, cimentos brancos ou coloridos, cimentos para poços de petróleo, cimento de aluminato de cálcio, cimento de alta resistência inicial, e cimentos exóticos tais como cimentos livres de macros defeitos e cimentos densificados (MEHTA, 1994, e NAWY, 1996).

A natureza do cimento é uma variável importante para a composição do concreto, já que influi diretamente no processo de hidratação, na consistência, na resistência da pasta e nas propriedades do concreto fresco e endurecido. Portanto, para produzir um concreto de alta resistência, a escolha adequada do cimento é um fator essencial (FIP/CEB, 1990).

Diante do grande número de marcas e classes de cimento disponíveis no mercado e, principalmente, devido à atividade reológica inerente a cada um, além da compatibilidade deles com os aditivos, torna-se difícil definir, a priori, qual das marcas e classes é mais adequada a uma dada finalidade. Por isso, em recente trabalho de dissertação, FERRARI (1995) estudou o desempenho de concretos de alta resistência produzidos com cimentos do tipo: CPII-E, CPIII, CPV Plus; essa pesquisa, entre outras, comprova a possibilidade de utilizar-se a maioria dos cimentos Portland. Contudo, ainda que seja viável a produção do CAR com vários tipos de cimento, não se deve, em hipótese alguma, negligenciar em sua escolha. Uma escolha impensada do tipo de cimento poderá acarretar maior demanda de água, aumento no consumo de cimento, maior calor de hidratação, surgimento prematuro de fissuras e possível redução na vida útil da construção.

Considerando-se as especificações de norma quanto às propriedades químicas, físicas e mecânicas, há uma grande probabilidade de que cimentos de um mesmo tipo mas produzidos por distintas indústrias apresentem diferentes finuras e composições químicas. Não obstante, tais diferenças poderão ser ampliadas quando se tratar de cimentos com adições (cinzas volantes, escórias de alto forno, filler calcário), pois além da possibilidade das adições participarem em diferentes teores há, ainda, a possibilidade de as mesmas possuírem diferentes resistências à compressão na idade de controle.



Portanto, um dos critérios a ser utilizado para a escolha da marca e o tipo de cimento deve ser a rigorosa análise da qualidade e da uniformidade dos cimentos.

Em se tratando, especificamente, de um único tipo de cimento é o fato de que as variáveis envolvidas são menores mas, nem por isso, menos significativas, pois as relações  $C_3S/C_2S$ , além de somatório ( $C_3S + C_2S$ ) podem mudar de um fornecedor para outro. Na figura 1.6 podem-se ver as variações de resistências à compressão quando da utilização de cimentos de mesmo tipo.

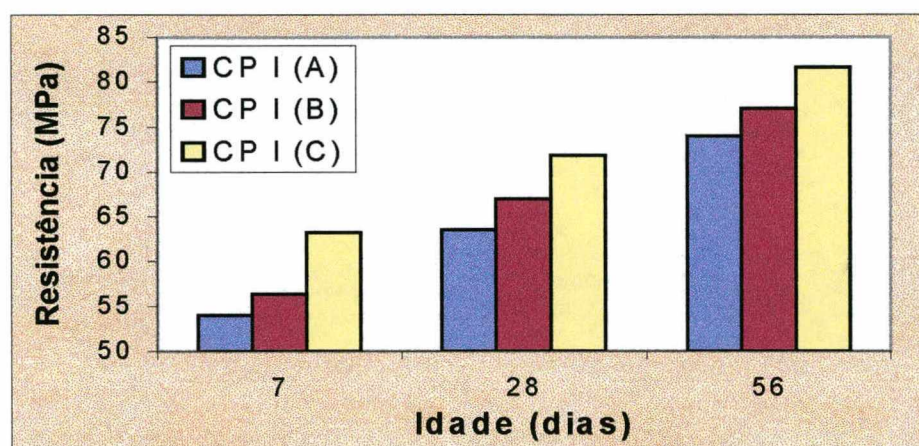


Figura 1-6 Resistência de cimentos de um mesmo tipo de diferentes indústrias, ACI-363-R (1992)

Para o ACI-363-R-92, é extremamente salutar que se conheça, através dos relatórios dos últimos 12 meses fornecidos pela indústria, as variações na composição química e finura e na resistência à compressão permitidas por norma, pois através dessas informações pode-se ter não apenas uma indicação da resistência à compressão, como também da uniformidade do cimento.

Para a produção de CAR deveriam ser estabelecidos alguns critérios de aceitação dos cimentos, os quais poderiam ser baseados em níveis máximos de variação, pelo menos de algumas propriedades físicas: finura Blaine, químicas (teor de  $SO_3$  e perda ao fogo) e resistência à compressão, aos quais o fornecedor deveria satisfazer.



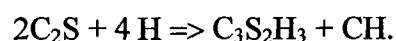
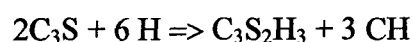
Conforme GJORV (1994), tanto a composição química e mineral como a distribuição granulométrica dos cimentos são importantes fatores a serem considerados na seleção desse material para o concreto de alta resistência.

Em adição ao desenvolvimento de resistência, o tipo de cimento é ainda importante na demanda de água e trabalhabilidade da mistura, para a qual, inicialmente, a quantidade de  $C_3A$  e a granulometria são os principais fatores de controle. A compatibilidade com os aditivos químicos é, outrossim, importante para a trabalhabilidade do concreto fresco.

A composição mineral e a finura do cimento são fatores que influenciam tanto na resistência inicial quanto na resistência final. O  $C_3S$  contribui tanto para as resistências iniciais como para as finais, contudo uma elevação na relação  $C_2S/C_3S$  é normalmente considerada benéfica para a resistência final. Na Noruega, cimentos que são desenvolvidos para estruturas das plataformas continentais do Mar do Norte possuem uma relação entre  $C_2S/C_3S$  na ordem de 0,54, sendo esse valor muito superior aos cimentos comuns que possuem uma relação em torno de 0,38, GJORV (1994).

Uma redução no calor de hidratação é, ainda, considerada benéfica para a alta resistência final. Assim, se elevada resistência inicial não for necessária, um cimento com características que contribuam para um baixo calor de hidratação, assim como menos  $C_3A$  e  $C_3S$  com baixa finura de álcalis, apresentará potencial para uma alta resistência final.

Objetivando enfatizar a importância do acréscimo da relação entre  $C_2S/C_3S$ , apresenta-se esquematicamente as reações estequiométricas a seguir:



Primeiramente a hidratação do  $C_3S$  produziria 61 % de C-S-H e 39 %  $Ca(OH)_2$ , enquanto o  $C_2S$  produziria 82 % de C-S-H e 18 % de  $Ca(OH)_2$ . Como a propriedade adesiva da pasta é devida principalmente à formação de CSH, pode-se concluir que a resistência final de um cimento com alto teor de  $C_2S$ .

Em segundo lugar, na hidratação do  $C_3S$  maior quantidade de CH é produzida, o que amplia a possibilidade de uma menor durabilidade, na pasta endurecida, quanto ao ataque de águas ácidas ou sulfatadas.

Finalmente, está a quantidade de calor liberada nas reações de hidratação, onde altas taxas de  $C_3S$  podem comprometer a qualidade das estruturas de concreto massa. A tabela 1-1 evidencia as diferentes quantidades de calor liberada na hidratação dos compostos de  $C_3S$  e  $C_2S$ .

Tabela 1-1 Calor de hidratação dos principais compostos de cimento, Mehta (1994)

Calor de hidratação a uma dada idade (cal/g)			
Compostos	3 dias	90 dias	13 dias
$C_3S$	58	104	122
$C_2S$	12	42	59

Pelo exposto, é possível perceber que a escolha do tipo e marca de cimento é de importância capital na tecnologia do CAR e exatamente por isso deve-se atentar para os seguintes aspectos: a) se elevada resistência aos primeiros dias não for requerida, então não se faz necessário empregar cimentos com alto teor de  $C_3S$  e/ou elevada finura ou área específica elevada (pois cimentos assim compostos, além de demandarem grande quantidade de água de mistura, liberam grande quantidade de calor e elevadas quantidades de hidróxido de cálcio), podendo-se optar por cimentos com elevadas relações de  $C_2S/ C_3S$ ; b) a compatibilização cimento e aditivo deve ser otimizada e, para isso, sugere-se, além dos ensaios de trabalhabilidade e perda de trabalhabilidade, cimentos com baixo teor de  $C_3A$ , e c) uniformidade na qualidade do cimento, verificável através dos relatórios fornecidos pela indústria.

1.5.2 Sílica ativa

1.5.2.1 Obtenção

A sílica ativa é um subproduto resultante do processo de obtenção de ferro-silício e silício-metálico, insumos utilizados na fabricação de componentes eletrônicos, silicones e alumínio.

Na redução do quartzo a silício, é produzido o monóxido de silício gasoso (SiO). Ele é transportado a zonas de temperaturas mais baixas (parte superior do forno), onde oxida ao entrar em contato com o ar, formando dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>), que se condensa em forma de partículas esféricas, extremamente pequenas (Ø médio ≅ 0,1 µm) e amorfas e por isso possuem elevada reatividade, sendo assim denominadas de sílica ativa (MEHTA, 1994).

A quantidade de sílica ativa obtida por tonelada depende das matérias primas utilizadas, tipo de liga produzida, tipo de forno, modo de operações e outros. A tabela 1-2 apresenta a relação entre a produção da liga metálica e a captação da sílica ativa, DALMOLIN (1995).

Tabela 1-2 Quantidade de sílica ativa gerada em função do tipo de liga produzida.

Liga Metálica	Sílica Ativa
100 Kg de Silício Metálico	550 Kg
100 Kg de Ferro Silício 75 %	350 Kg
100 Kg de Ferro Silício 50 %	90 Kg

1.5.2.2 Características físicas e químicas da sílica ativa

A sílica ativa é constituída de esferas com tamanho médio de 0,1 µm, sendo em torno de duas ordens de grandeza mais finas que as pozolanas moídas (10 a 15 µm). Possuem área específica de 20.000 a 30.000 m<sup>2</sup>/Kg, em lugar de 500 a 2.000 m<sup>2</sup>/Kg das pozolanas moídas (DIAMOND, 1984).

A sílica ativa pertence a uma classe superior de pozolanas, pois, mantida a mesma fonte de captação, não sobre variabilidade na composição e não sofre heterogeneidade nas características mineralógicas (DALMOLIN, 1995).

Para MEHTA (1994), a área específica da sílica ativa oscila entre 20.000 e 25.000 m<sup>2</sup>/Kg. Contudo, conforme PEREIRA NETO (1995), pode ocorrer variação de 13.000 a 25.000 m<sup>2</sup>/Kg.

A massa específica aparente da sílica ativa encontra-se em torno de 2.200 Kg/m<sup>3</sup> e a massa unitária varia de 200 Kg/m<sup>3</sup> no estado solto, a 600 Kg/m<sup>3</sup> no estado densificado.

As sílicas ativas, sendo subproduto da obtenção de diferentes tipos de ligas, apresentarão características físicas e químicas peculiares ao processo que lhes deu origem, de tal forma que o teor de óxido de silício da sílica ativa, proveniente da liga de ferro silício 75 %, oscila de 85 à 95 %, enquanto essas porcentagens são menores para as sílicas ativas oriundas da liga de ferro silício 50 %.

#### **1.5.2.3 Efeitos físicos da sílica ativa no concreto fresco**

A sílica ativa modifica o comportamento do concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. No concreto fresco, sua presença se faz sentir através da alteração do comportamento reológico, o qual é manifesto por uma mudança na trabalhabilidade e exsudação. Portanto, o comportamento estático e dinâmico dos concretos com sílica ativa difere dos concretos convencionais (MORAES, 1990).

Sabe-se que a reologia do concreto é função da distribuição das partículas granulares, que variam de dimensões micrométricas, (cimento e sílica ativa) a dimensões centimétricas (agregados graúdos), (SOBRAL, 1990). Considerando-se que a coesão do concreto cresce com quantidade de finos, e na razão inversa ao tamanho das partículas, é de se esperar que a coesão no concreto aumente com a redução da relação água/materiais cimentantes e com a porcentagem de sílica ativa presente na mistura.

Foi comprovado que a substituição parcial do cimento Portland por sílica ativa altera de forma efetiva no acréscimo da demanda de água das misturas. O aumento na demanda de água é também influenciado pelo tipo de cimento utilizado.

O efeito filler ocorre pelo preenchimento dos espaços entre os produtos de hidratação do cimento e/ou grãos de cimento e agregado por diminutas partículas de sílica ativa, propiciando uma densificação na pasta e na zona de transição.

Os concretos fluidos com sílica ativa têm uma consistência mais adequada à utilização de peças com elevada taxa de armadura e geometria complexa que os concretos convencionais. São, outrossim, adequados à utilização de concreto projetado e concretagem submersa, tendo inclusive maior rendimento (MORAES, 1990).

#### **1.5.2.4 Efeitos da sílica ativa na microestrutura do concreto endurecido**

A sílica ativa é usada para reduzir as heterogeneidades da matriz e na zona de transição, que são fatores limitantes da resistência do concreto (MEHTA, 1994).

Sua presença no concreto altera substancialmente suas propriedades da pasta e zona de transição. Essa alteração ocorre tanto física como quimicamente.

A alteração da microestrutura da zona de transição produzida pela presença da sílica ativa é de importância relevante. Ela interfere na movimentação das partículas de água e reduz a exsudação interna, diminuindo a espessura da zona de transição.

Os grãos da sílica ativa atuam como locais de precipitação (pontos de nucleação), aumentando a velocidade de hidratação dos cimentos. ROY (1989), Apud DALMOLIN (1995), identificou a velocidade de hidratação da sílica ativa com o hidróxido de cálcio, com 10 % da sílica ativa e 90 % de cimento, que ocorreu 50 % no primeiro dia e 66 % nos três primeiros dias, sendo o restante das reações de lenta ocorrência. Contudo, REGOURD et al., Apud DALMOLIN (1995), relata que nem todas as partículas de sílica ativa reagem com a mesma velocidade, ainda que sejam provenientes de uma

mesma fonte. Algumas reagem nas primeiras 24 horas enquanto outras reagem antes de um mês.

A formação de produtos secundários, principalmente de silicatos de cálcio hidratado ao redor das partículas de sílica ativa, tende a preencher os vazios capilares de baixa densidade. O processo de transformação de um sistema contendo grandes vazios capilares em um produto microporoso contendo muitos vazios pequenos é referido como refinamento de tamanho de poro. Do mesmo modo, a nucleação do hidróxido de cálcio ao redor das partículas finas e bem distribuídas da sílica ativa terá o efeito de substituir os cristais grandes e orientados por numerosos cristais pequenos, menos orientados e pouco cristalinos. O processo de formação de um sistema, contendo grãos grandes de um componente, em produto de grãos menores é referido como refinamento do tamanho do grão. Ambos processos melhoram a zona de transição e contribuem para o aumento da resistência e redução da permeabilidade e microfissuração (PAULON, 1991).

Atenção especial às características físicas da sílica ativa, principalmente diâmetro máximo e granulometria,, deve ser dada, pois estas afetam sobremaneira o desempenho à compressão dos concretos de alta resistência, ainda que possuam composição química bastante semelhante (OLIVEIRA et al, 1991). Este trabalho confirma as observações de MEHTA (1989), apud DALMOLIN (1995), estudaram a influência de três tipos diferentes de sílica ativa, contendo 92, 70 e 66 % de  $\text{SiO}_2$  e área específica de 25.000, 44.900 e 18.500  $\text{m}^2/\text{Kg}$  e também concordaram com posicionamento de MEHTA (1989), concluindo que os efeitos diferenciados na microestrutura e resistência dos concretos se devem, principalmente, ao tamanho das partículas adicionadas e não ao conteúdo de  $\text{SiO}_2$ .

Os ganhos de resistência obtidos pela substituição de parte do cimento por sílica ativa dependem basicamente dos seguintes fatores: relação água/ materiais cimentantes, tipo de cimento utilizado, porcentagem de substituição, finura e composição granulométrica da sílica ativa, condições de cura e idade avaliada.

### 1.5.3 Aditivos

#### 1.5.3.1 Introdução

Os aditivos são substâncias químicas usadas para modificar as propriedades do concreto ou de argamassas com o objetivo de fazê-los mais adequados para o trabalho e manuseio, mais econômicos ou para tantos outros propósitos, tais como reduzir a energia (ACI-212, 1993).

A NBR 11768 (EB- 1763/92) define os aditivos como produtos que, adicionados em pequenas quantidades a concretos e de cimento Portland, modificam algumas de suas propriedades, no sentido de melhor adequá-las a determinadas condições. Essa mesma norma classifica os aditivos em: Tipo P: plastificante; Tipo R: retardador; Tipo A: acelerador; Tipo PR: plastificante retardador; Tipo PA: plastificante acelerador; Tipo IAR: incorporador de ar; Tipo SP: superplastificante; Tipo SPR: superplastificante retardador; Tipo SPA: superplastificante acelerador.

A compreensão de que a utilização dos aditivos no concreto poderia gerar vantagens técnicas e/ou econômicas, sem efeitos colaterais indesejáveis, ampliou seu universo de aplicação. Nos últimos anos ocorreu um aumento crescente na utilização desses produtos em alguns países. Não é incomum o fato de 70 a 80 % de todo concreto ser produzido com um ou mais aditivos (MEHTA, 1994).

O uso dos aditivos, para diversas funções, está se tornando cada vez mais difundido no mundo todo.

Dados de 1988, conforme GIAMMUSSO (1988), mencionam os números da tabela 1-3.

Tabela 1-3 Dados do uso de concretos aditivados em alguns países.

País	% de concreto aditivado
Estados Unidos	80%
Japão	80%
Austrália	70%
Alemanha	60%
Itália	25%
França	15%
Reino Unido	12%

Os aditivos são usados para modificar as propriedades do concreto fresco, argamassa ou de grante tais como:

- melhorar a trabalhabilidade sem aumentar a quantidade de água ou diminuir a quantidade de água mantendo a mesma trabalhabilidade;
- aumentar ou diminuir o tempo de pega;
- diminuir a exsudação;
- reduzir a segregação;
- reduzir a velocidade de perda da trabalhabilidade.

Conforme o ACI-212 (1993), os aditivos são ainda utilizados para modificar as propriedades do concreto durante a cura e quando endurecido das seguintes formas:

- retardar ou reduzir a evolução do calor, em especial nas primeiras idades;
- acelerar a resistência nas idades mais recentes;
- aumentar a resistência (compressão, tração ou flexão);



- aumentar a durabilidade, pela redução da porosidade capilar, em condições severas de exposição, incluindo descongelamento com sais;
- reduzir a permeabilidade do material;
- controlar a expansão causada pela reação de álcalis com certos constituintes do concreto;
- melhorar a aderência entre o concreto e o aço, em concreto armado;
- melhorar a aderência entre o concreto existente e o novo concreto;
- aumentar a resistência ao impacto e à abrasão;
- inibir a corrosão às armaduras;
- produzir coloração nos concretos ou argamassas.

O uso de aditivos químicos requer um conhecimento aprofundado das suas propriedades, efeitos, desvantagens e inconveniências. Sendo substâncias químicas que modificam propriedades químicas e físicas, elas estão sujeitas a toda sorte de reações com os diversos componentes dos concretos e as alterações de desempenho provocadas por uma série de fatores tais como: temperatura, concentração, tempo decorrido após a adição, etc. (BUCHER, 1988).

Uma cuidadosa atenção deve ser dada às informações provenientes dos fabricantes de aditivos. Os efeitos dos aditivos devem ser avaliados sempre que possível com os materiais específicos e condições de uso desejadas. Semelhante avaliação é em particular importante quando:

- os aditivos não tenham sido usados anteriormente com a combinação específica de materiais;

- tipos especiais de cimentos não especificados;
- mais de um aditivo será utilizado;
- mistura e coloração serão feitas a temperaturas acima das recomendadas.

Os aditivos que alteram as propriedades do concreto fresco podem causar problemas de alteração no tempo de pega. A causa do comportamento anormal da pega deveria ser determinada através de estudo de como o referido aditivo afeta o cimento.

O desempenho de um aditivo qualquer é influenciado em grande escala pelas características do cimento e agregados e suas proporções relativas, bem como pela temperatura, umidade e condições de cura. Além disso, a avaliação econômica de um dado aditivo deve ser baseada nos resultados que forem obtidos com o concreto em questão, simulando-se as condições em que o mesmo ficará exposto, ACI 212 (1993).

As características dos cimentos que mais influem sobre o desempenho dessas substâncias químicas são os teores de álcalis e sulfatos e a finura de moagem (BUCHER, 1988).

Os aditivos, quando utilizados de forma adequada e otimizada permitem a produção de concretos com elevados níveis de qualidade. Essa qualidade pode ser expressa através da melhor relação custo/benefício, ou devido ao alto desempenho técnico e, na grande maioria das vezes, pela combinação harmônica dessas vantagens.

As principais interações que o usuário deve conhecer no instante da aplicação de um aditivo químico são: a) “aditivo/aditivo”, quando mais de um produto é incorporado no mesmo concreto e b) “aditivo/cimento”, devido ao fato de um mesmo aditivo ser capaz de apresentar comportamento variável em combinação com os cimentos comerciais disponíveis (BUCHER, 1988).

O sucesso do uso do aditivo depende, entre outras coisas, do apropriado método de adição e mistura. Negligenciar um desses procedimentos resultará numa alteração significativa nas propriedades do concreto (desempenho e uniformidade).

A adição do aditivo envolve não apenas a correta medição de sua quantidade e controle de descarga, mas a cronometragem na sequência de mistura. Em alguns casos, mudando o tempo no qual o aditivo é adicionado pode-se alterar a sua eficiência. A água de mistura no aditivo pode também ser afetada significativamente.

Dois ou mais aditivos, freqüentemente, não são compatíveis na mesma solução. Mistura entre aditivos antes da introdução no concreto deveriam ser evitadas a menos que ensaios indicassem a inexistência de efeito adverso, ou que o fabricante permitisse isto, ACI-212 (1993).

Deve-se ressaltar que os aditivos, de uma forma geral, ampliam determinadas propriedades do concreto mas os mesmos não são miraculosos, ou seja, não irão suprir a deficiência de uma dosagem.

#### **1.5.3.2 Aditivos plastificantes**

O concreto poderia, idealmente, ter apenas água o suficiente para o desenvolvimento das reações de hidratação, enquanto produzisse a reologia necessária para uma fácil colocação. Desafortunadamente, os cimentos Portland disponíveis excluem essa possibilidade. Isso porque as partículas de cimento possuem muitas cargas elétricas superficiais não neutralizadas, tendo uma estranha tendência a flocularem quando em contato com o líquido tão polar quanto a água. Isso explica por que, quando apenas cimento e água são usados, é necessário usar maior quantidade de água para satisfazer a hidratação das partículas de cimento (AITCIN, 1994).

Os plastificantes têm a função de reduzir o teor de água de mistura em torno de 5 a 10 %, podendo chegar até a 15 %. Os principais aditivos plastificantes são:

- ácidos lignossulfônicos e seus sais;
- ácidos carbossílicos hidroxilados e seus sais;

- ácidos cítrico;
- ácido glicônico.

Os aditivos plastificantes são utilizados com o objetivo de reduzir a tendência à floculação e com isso reduzir a quantidade de água de mistura. Esses aditivos consistem de tensoativos, os quais podem ser aniônicos, catiônicos e ainda não iônico, com longa cadeia e elevada massa molecular. Os plastificantes se concentram na interface entre duas fases não miscíveis alterando as forças físico-químicas atuantes nessa interface. Tais componentes são absorvidos nas partículas de cimento, conferindo uma carga negativa, que resulta em uma repulsão entre as partículas, ou seja, uma defloculação, em que as bolhas de ar também são repelidas e não podem aderir às partículas de cimento (MEHTA, 1994; NEVILLE, 1997).

Quando são usados na função específica de plastificar, mantendo constante a relação água/cimento, chega-se à trabalhabilidade que permite melhor adensamento, evitando bicheiras e segregações mesmo em peças densamente armadas; quando usadas como redutores de água permitem redução no consumo em até 15 %.

Aditivos redutores da água de amassamento de pastas, argamassas e concretos são coadjuvantes valiosos na tecnologia do concreto de cimento Portland.

### 1.5.3.3 Aditivos superplastificante

Os superplastificantes, desenvolvidos nos anos 70 por alemães e japoneses, são tensoativos de alta eficiência, capazes de 20 a 25 % a quantidade de água de mistura, um dado traço do concreto, quando comparados com os aditivos plastificantes. São tensoativos aniônicos de cadeia longa e massa molecular elevada que, quando absorvidos pelas partículas de cimento, conferem uma forte carga negativa, a qual auxilia a reduzir consideravelmente a tensão superficial da água circundante e a aumentar a fluidez do sistema. A dispersão das partículas do cimento no sistema parece acelerar a taxa de hidratação, sendo comum ocorrer a aceleração da pega e do endurecimento (MEHTA, 1994).

Os superplastificantes são adjuvantes essenciais para a produção de concreto de alto desempenho, pois permitem que os mesmos possam ser produzidos nas usinas de concreto padronizadas e usados tão facilmente quanto nos concretos convencionais com a utilização de equipamentos convencionais (AITCIN, 1994).

Adicionado ao concreto em quantidades que variam de 0,5 a 3 % em relação à massa do cimento, os superplastificantes são capazes de reduzir a água requerida entre 25 e 30 %. A redução de água e/ou ganho de trabalhabilidade obtido com os superplastificantes depende da natureza física e química do cimento Portland. Pequenas variações na finura e/ou composição química podem, em alguns casos, alterar significativamente seus efeitos. Apesar das contínuas investigações, o exato papel dos superplastificantes na absorção e hidratação do cimento não está completamente entendida, conforme RAMACHANDRAN (1983).

A redução na consistência, que é freqüentemente observada como uma interação físico-química entre o superplastificante e o cimento, é normalmente ocasionada com a formação da etringita. Devido à baixa solubilidade, cristais de etringita começam a se precipitar na solução. A água livre no sistema fica encapsulada no meio dos cristais precipitados e ainda fica absorvido ao redor dos cristais de etringita. O resultado da redução da água livre gera a perda da trabalhabilidade. Além do mais, cimento Portland com elevado teor de  $C_3A$  pode exibir rapidíssima perda de abatimento na presença de superplastificantes contendo grandes quantidades de íons de sulfatos livres. A perda de trabalhabilidade é ainda maior a elevadas temperaturas (GJORV, 1994).

Os superplastificantes podem ser agrupados em quatro categorias, de acordo com sua composição química, e são os seguintes:

- condensados de Formaldeído Melamina Sulfonados – MSF -. Desenvolvidos pelos alemães, podem eventualmente incorporar pequenas quantidade de ar (GJORV, 1994);
- condensados de Formaldeído Naftaleno Sulfonado – NSF -. Desenvolvidos pelos japoneses, não incorporam ar e praticamente não interferem no tempo de pega do

cimento . No entanto, quando usado em altas dosagens, podem retardar o tempo de pega dos cimentos (AITCIN, 1987);

- Lignossulfonatos Modificados. Essas substâncias geralmente incorporam ar e retardam o tempo de pega;
- outros, com ácidos e ésteres sulfônicos e ésteres carboxílicos.

Experiências têm mostrado que a eficiência de um superplastificante depende não apenas do teor de sólidos, mas também da qualidade do sólido (comprimento de cadeia de moléculas, quantidades de impurezas, quantidades de resíduos de sulfonatos, etc.). Isso explica por que a escolha final de um superplastificante não deve ser baseada no conteúdo do sólidos ou no preço por litro, mas na comparação de sua eficiência econômica, a qual é expressa em valor monetário a ser gasto para alcançar um determinado nível de resistência ou trabalhabilidade (AITCIN, 1994).

Os condensados formaldeídicos de naftalenosulfato e melaminasulfatos são os superplastificantes por excelência e não mostram efeitos secundários significativos.

#### **1.5.4 Agregados**

##### **1.5.4.1 Agregados miúdos**

Especial atenção deve ser dada à escolha do agregado miúdo, uma vez que sua granulometria e/ou forma pode alterar significativamente a quantidade de água de mistura. Um dos critérios utilizados na seleção dos agregados miúdos baseia-se na menor demanda de água de mistura. Isso privilegia os agregados com grãos arredondados e textura lisa. A granulometria do agregado miúdo influencia na reologia do concreto; areia com módulos de finura abaixo de 2,5 têm produzido concretos de alta resistência com consistência pegajosa, dificultando a compactação, ao passo que concretos produzidos com areias de módulo de finura ao redor de 3,0 apresentam melhor trabalhabilidade e maior resistência à compressão, ACI-363-R (1992).

A chave para o projeto de mistura do concreto de alta resistência é a baixa relação água/cimento. Para obter isso com uma quantidade de cimento relativamente alta e aditivos redutores de água, a quantidade de água requerida pelo componente agregado, para uma dada consistência do concreto, tem que ser tão baixa quanto possível. “Essa água requerida é inicialmente governada pela distribuição granulométrica das partículas, pela forma das partículas e pela composição mineralógica dos agregados miúdos” (GVORV, 1994).

É de capital importância ter-se em mente que pequenas variações na umidade dos agregados miúdos serão responsáveis por significativas variações na qualidade do concreto. Portanto, espera-se que, além do rigoroso cumprimento das normas, adote-se adequados procedimentos de recebimento e estocagem do material.

Para que se possa reduzir as variações de granulometria e módulo de finura, observáveis na areia natural disponível, causadas pelas oscilações na vazão dos rios, deve-se adotar um controle bastante rígido durante as operações de dragagem. Contudo, se a areia utilizada for artificial, além do controle granulométrico, deve-se verificar sistematicamente o teor de material pulverulento.

Como parte importante para garantir a qualidade e o controle de produção dos concretos de alta resistência, é extremamente importante manter um apropriado controle no teor de umidade dos agregados miúdos. Variações de 1 % na umidade do agregado miúdo será o suficiente para gerar enorme impacto na resistência (GVORJ, 1994).

#### **1.5.4.2 Agregados graúdos**

Um estudo pormenorizado das influências dos agregados graúdos nos concretos de alta resistência será apresentado no capítulo 2.

### **1.6 Considerações sobre os métodos de ensaio e cura em concretos de alta resistência**

### 1.6.1 Tamanho e forma dos corpos de prova

O tamanho e a forma dos corpos de prova para o ensaio de resistência à compressão varia, amplamente, de país para país. Na Europa é bastante comum o uso de corpos de prova cúbicos, que são mais pesados, não requerem capeamento e apresentam resistências à compressão de aproximadamente 25 % a mais que os corpos de prova cilíndricos. O tamanho do corpo de prova é importante porque ele fica condicionado à capacidade de carga da máquina de ensaio. Na América do Norte a capacidade de carga é costumeiramente tomada como sendo 150 % da carga de ruptura, AÏTCIN & LESSARD (1992).

GOMES (1995) cita que em 1992 foi realizada na Universidade de Sherbrooke (Québec-Canadá) uma pesquisa envolvendo 61 concretos com resistências de 30 a 130 MPa, que apresentou os seguintes resultados:

- para concretos com resistências de 30 a 50 MPa, a relação de resistência entre as médias dos corpos de prova de 15 x 30 e 10 x 20 cm foi de 91 %. Portanto, os concretos moldados em corpos de prova de 15 x 30 cm apresentam quase 10 % a menos de resistência;
- para os concretos com níveis de resistência de 70 a 130 MPa, essa relação foi de 94 %, de forma que os corpos de prova de 15 x 30 cm apresentam 6 % a menos de resistência à compressão.

Uma das prováveis causas para ganhos de resistência pode estar vinculada à possibilidade de uma maior densificação do concreto.

CARINO (1996) ao realizar análise de desempenho entre corpos de prova de 10 x 20 cm e de 15 x 30 cm encontrou diferenças de apenas 1,3 % entre as médias das resistências.

### 1.6.2 Método de capeamento



Os concretos de alta resistência quando ensaiados à compressão são mais sensíveis às imperfeições no topos dos corpos de prova que os concretos convencionais. Dependendo do grau dessas imperfeições, o estado de solicitações pode ser modificado e, conseqüentemente, o comportamento do concreto à fratura. Uma das formas adotadas para reduzir esse efeito tem sido a de retificar os topos dos corpos de prova.

O capeamento dos topos dos cilindros com argamassa de enxofre é sórdido, freqüentemente arriscado e consome muito tempo de trabalho, requerendo a habilidade de um experiente técnico para assegurar a adequada preparação da amostra. Face a essa gama de inconvenientes, CARRASQUILLO & CARRASQUILLO (1988) propuseram capeamento não aderentes, constituídos de anéis de alumínio ou aço, dentro dos quais se acoplava almofadas de poliuretano ou neoprene. Os anéis são colocados nas extremidades dos cilindros.

Os resultados da pesquisa realizada por CARRASQUILLO & CARRASQUILLO (1988) revelaram que, para os concretos entre 40 MPa e 110 MPa, a variação interna dos cilindros de concretos ensaiados usando capeamento não aderente foi, na média, menor que os cilindros capeados com argamassa de enxofre de alta resistência. Para os concretos com resistências entre 40 MPa e 68,95 MPa o resultado dos testes sem capeamento produziram valores em média de 97 % daqueles usados com argamassa de enxofre. Já os concretos com resistência acima de 68,95 MPa, apesar da variação interna ser menor para os ensaios de capeamento não aderentes que naqueles com argamassa de enxofre de alta resistência, a resistência média dos cilindros testados usando esse capeamento não aderente foi, geralmente, muito maior.

LOBO et alli (1994) estudaram a influência da espessura do capeamento e do tipo de material empregado (argamassa de cimento com relação água/cimento = 0,32 e 0,36 e argamassa de enxofre comum e enxofre de alta resistência). Analisaram, outrossim, a influência do intervalo entre o capeamento e o ensaio de resistência. Nesse trabalho foram empregados concretos com resistência de 50, 75 e 120 MPa. Com os resultados desse trabalho pode-se concluir que para os corpos de prova capeados com argamassa de cimento com espessura de 1,9 mm e 6,4 mm as resistências foram, na média, superiores aos retificados, independente da resistência dos concretos. Já para os corpos de prova capeados com enxofre foi possível constatar perdas de resistência na ordem de

2,5 % para os capeamentos com espessura de 1,6 mm e perdas de cerca de 6,0 % para os capeamentos com 4,8 mm, isso para os corpos de prova moldados com concretos resistência de 50 MPa. Para os moldados com resistência de 75 MPa não foi possível constatar diferenças significativas de resistência. Contudo, para os corpos de prova que foram moldados com concretos de 120 MPa, notou-se ganhos de resistência de aproximadamente 2 % para os capeamentos de 1,6 mm e perdas de resistência para os capeamentos de 4,8 mm, na ordem de 3,5 %. As perdas ou ganhos expostos neste trabalho referem-se aos corpos de prova com topos retificados.

### 1.6.3 Efeito da cura

Denomina-se cura a série de procedimentos, adotados em peças de concreto ou em estruturas de concreto armado, que objetivam dar continuidade ao processo de hidratação dos compostos anidros, imersos na massa de concreto. O ganho obtido pela adoção desses procedimentos será proporcional à eficácia dos métodos, do tipo de cimento e, principalmente, da vigência dos procedimentos.

Constituintes do cimento, altamente reativos, hidratam-se à medida em que entram em contato com a água. Esses produtos de hidratação cobrem os grãos de cimento anidro, os quais só irão se hidratar em condições de saturação em água. A hidratação do volume remanescente desses grãos é normalmente lenta, pois a água necessita, por difusão, atravessar sistematicamente um maior número de compostos.

Para uma dada relação água/cimento, a porosidade da pasta endurecida de cimento hidratada é determinada pelo grau de hidratação do cimento (MEHTA, 1994).

NEVILLE (1997) relata que a queda da resistência em concretos devido a uma cura inadequada é mais pronunciada em misturas ricas e chamam a atenção para a importância da cura nas primeiras idades em CAR.

Tanto a resistência à compressão quanto a resistência à flexão do CAR são menores, quando curadas ao ar livre, que quando curadas em condições normalizadas, (CARRASQUILLO & CARRASQUILLO).

Para MEHTA (1994), um período mínimo de 7 dias de cura úmida é geralmente recomendado para concreto contendo cimento Portland comum; evidentemente, para concretos contendo cimento Portland composto ou com adição mineral, será desejável a cura por um período mais longo a fim de garantir a contribuição na resistência das reações pozolânicas.

Através de análise de recentes dados, DALMOLIN (1995) verificou a influência da cura em misturas de concreto, com diferentes relações água/materiais cimentantes e em várias idades. A tabela 1-4 demonstra.

Tabela 1-4 Análise dos ganhos de resistência à compressão, pelo emprego de cura adequada

Ganhos de resistência obtido pela cura em função da relação a/(c+sa)						
a/(c+sa)	Resistência ; ( 7 dias ) (MPa)			Resistência ; ( 28 dias ) (MPa)		
	Tipo de cura		Ganho	Tipo de cura		Ganho
	úmida	ambiente		úmida	ambiente	
0,25	73,8	70,2	5%	92,4	85,3	8,3%
0,28	63,5	60,5	5%	80,7	75,3	7,2%
0,32	59,9	57,4	4%	71,1	66,1	7,6%
0,37	50,2	45,5	10%	66,1	60,8	8,7%
0,43	43,9	41,6	6%	55,6	50,8	9,4%
Ganho médio aos 7 dias			6,1%	Ganho médio aos 28 dias		8,2%

CARRASQUILLO & CARRASQUILLO (1988) mostram que os efeitos das condições de cura na resistência à flexão de vigas são muito mais pronunciados que nos cilindros de resistência à compressão. As vigas deixadas em condições ambientais de cura tiveram apenas 58 % da resistência das vigas curadas em câmaras úmidas.

## Capítulo 2: A influência dos agregados graúdos nos concretos de alta resistência

### 2.1 Considerações iniciais

Entende-se por agregado graúdo o material granular sem forma e volume definidos, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para o uso em obras de engenharia.

Os agregados graúdos, quando obtidos do britamento de rochas, são classificados como artificiais, conforme a NBR 9935/1987. Os fragmentos rolados no leito dos cursos d'água e os materiais encontrados em jazidas, provenientes de alterações de rochas, são considerados como agregados naturais. Os agregados graúdos são os que ficam retidos na peneira de malha quadrada de 4,8 mm. O tamanho do agregado usado no concreto se estende de dezenas de milímetros até partículas com seção transversal menor que um décimo de milímetro. O tamanho máximo realmente usado varia, mas em cada mistura são incorporadas com partículas de diferentes tamanhos; a distribuição desses tamanhos se denomina granulométrica. A NBR 7211/83 estabelece os limites granulométricos do agregado graúdo, classificando-o em graduações de zero a quatro, conforme a distribuição granulométrica. Os agregados são também classificados em função da massa específica em agregados leves até  $2000 \text{ Kg/m}^3$ , agregados normais de  $2000 \text{ Kg}$  até  $3000 \text{ Kg/m}^3$  e agregados pesados acima de  $3000 \text{ Kg/m}^3$ .

Conforme NEVILLE (1997), todas as partículas de agregados naturais eram, originalmente, parte de uma massa maior. Houve fragmentação por processos naturais de intemperismo e abrasão ou artificiais por britamento. Assim, muitas propriedades do agregado dependem exclusivamente das propriedades da rocha-mãe, como composição química e mineralógica, características petrográficas, densidade, dureza, resistência, estabilidade química e física, estrutura de poros e cor. Por outro lado, algumas propriedades dos agregados não estão presentes na rocha-mãe: forma e tamanho de partículas, textura superficial e absorção.

Para GJORV (1994), as características dos agregados são derivadas do processo geológico de formação das técnicas de desmonte utilizadas, da mineralogia e petrografia da rocha do origem, das condições de exposição e dos equipamentos de britagem.

Para BAUER (1992), nos agregados industrializados a forma dos grãos depende da natureza da rocha e do tipo de britador. O granito produz grãos de melhor forma que o basalto, que produz apreciável quantidade de grãos lamelares. Quanto ao efeito dos britadores, o de mandíbulas é o que produz grãos mais irregulares (especialmente em rochas menos tenazes, como o basalto) e o de martelos produz as formas mais regulares. Os britadores de cone situam-se entre esses dois.

Para obter uma completa avaliação do agregado são necessários estudos que partam desde o mapa litográfico até a análise microquímica dos grãos, muito embora a microscópica ótica possa propiciar rapidamente grande quantidade de informações. Não obstante, é necessário considerar que a maioria dos agregados graúdos é obtida através de processos industriais e, assim sendo, sua qualidade final também dependerá da sinergia entre propriedades mecânicas da rocha, processos e equipamentos de britagem empregados durante a produção. Outro aspecto a ser salientado é que após a britagem podem-se obter agregados com diferentes graus de microfissuração.

No Brasil, as rochas mais comumente britadas para a obtenção de agregados graúdos para concreto são: basalto, quartzito, granito, calcário, gnaiss e arenito. As qualidades resistentes dessas rochas em estado não alterado e compacto são decrescentes na mesma ordem. A resistência à compressão desses agregados, encontra-se num intervalo de 50 a 450 MPa; a resistência à tração de 50 a 300 MPa e o módulo de elasticidade entre 20 e 100 GPa, segundo RODRIGUES e SANTOS (1988). Para NEVILLE (1997) e MEHTA (1994), é possível encontrar agregados pertencentes à mesma família com propriedades mecânicas bastante variáveis. Os calcários, por exemplo, possuem resistência que variam de 90 a 240 MPa, enquanto que essa faixa é ainda mais ampla entre os arenitos oscila de 48 a 240 MPa. Para os granitos, basaltos e calcários densos, este intervalo oscila de 210 a 310 MPa. A existência desses intervalos de resistência suscita, no mínimo, alguns minutos de reflexão, principalmente quando se pretende estabelecer generalizações a partir do resultado de outros trabalhos e/ou pesquisas desenvolvidas em outras localidades ou regiões.

## **2.2 Influência dos agregados graúdos na resistência à compressão dos concretos de alta resistência**

A qualificação dos agregados graúdos para o emprego nos concretos deve ser baseada, a princípio, no cumprimento das especificações e exigências prescritas nas normas atuais, tais como: NBR 7211/1983 e NBR 12654/1992.

O agregado graúdo, salvo raras exceções, custa bem menos que o cimento, portanto, quanto mais agregado se empregar no concreto, mais econômico ele será. Mas a economia não é a única razão para seu emprego, já que o agregado confere consideráveis vantagens técnicas ao concreto, principalmente estabilidade dimensional e melhor durabilidade (NEVILLE, 1997).

Para MEHTA (1994), os agregados não entram em reações químicas complexas com a água, portanto, têm usualmente tratados como material de enchimento inerte no concreto. Entretanto, devido à crescente compreensão do papel desempenhado pelos agregados em muitas propriedades dos concretos, esse ponto de vista tradicional vem sendo seriamente questionado. Para NEVILLE (1997), o agregado não é inerte na exata acepção da palavra e suas propriedades físicas, térmicas e, às vezes, químicas, têm influência no desempenho do concreto.

Ainda que os agregados participem de 60 a 80 % do volume do concreto, normalmente não se dá muita atenção aos possíveis efeitos que possam exercer nas propriedades do concreto fresco e/ou endurecido. No entanto, é considerável a influência que eles exercem na resistência, estabilidade e durabilidade do concreto (MEHTA, 1994).

Para a tecnologia do concreto, as características mais importantes do concreto são: porosidade, composição granulométrica, absorção de água, forma, textura superficial, resistência à compressão, módulo de elasticidade e tipos de substâncias deletérias presentes. A massa específica, a composição granulométrica e o teor de umidade são fatores indispensáveis para a dosagem dos concretos. Absorção, forma, granulometria, textura superficial, composição granulométrica e massa específica determinam as

propriedades do concreto no estado fresco. O módulo de elasticidade, a resistência à compressão, a permeabilidade, a resistência ao gelo, ao degelo e à abrasão são itens que afetam significativamente as propriedades dos concretos endurecidos.

A granulometria, a dimensão máxima, a forma e a textura do agregado também tem sido sugeridas como fatores que influenciam na retração por secagem e fluência. No entanto, geralmente concorda-se que o módulo de deformação dos agregados é uma das características que mais afetam aquelas propriedades. O efeito sobre outras propriedades pode ser analisado de forma indireta, isto é, através do seu efeito no conteúdo de agregado ou na capacidade de adensamento da mistura de concreto (MEHTA, 1994).

A resistência final dos CAR resulta do processo interativo de muitas variáveis, tais como: a) materiais constituintes; b) processos de produção; c) condições de exposição e d) tipo de solicitação externa. Quando se mantêm constantes os processos de produção, condições de exposição e tipo de solicitação externa, é possível constatar que as características físicas e mecânicas dos agregados graúdos afetam sobremaneira as propriedades mecânicas dos concretos endurecidos de alta resistência.

A zona de transição é uma das fases constituintes do concreto. Ela é resultante do processo interativo de muitas variáveis, entre as quais encontra-se o agregado graúdo, o qual participa com um subgrupo de variáveis: mineralogia, absorção, forma, textura e dimensão dos grãos, relação água/cimento, teor de superplastificantes, quantidade e qualidade do material pozzolânico, além do grau de hidratação da pasta. Quando a zona de transição é suficientemente forte para transferir tensões entre o agregado e pasta e vice-versa, será a qualidade do agregado que definirá a resistência última do concreto (MEHTA, 1994).

Nos concretos convencionais com relação água/cimento oscilando, tipicamente, no intervalo de 0,4 a 0,7 o componente mais fraco no concreto é a pasta de cimento endurecido ou a zona de transição. Neles, a resistência é normalmente inferior a 40 MPa e, para esses níveis de solicitação, as propriedades do agregado raramente tornam-se limitadoras da resistência do concreto. De forma que, para esses concretos, a preocupação dos tecnólogos é mais voltada às questões de custo e trabalhabilidade. Contudo, para produção de concretos de alta resistência e, particularmente, para os de

muito elevada resistência, as misturas de concreto necessitam ser feitas com relações água/cimento de 0,2 à 0,3, (AÏTCIN e MEHTA, 1990). Para esses concretos, os pesquisadores têm observado que a pasta de cimento endurecida e a zona de transição não são fatores limitantes da resistência. Ao contrário, é a mineralogia e a resistência do agregado que controlam a resistência final do concreto.

Conforme MEHTA (1994), para a produção de concretos de alta resistência, a experiência tem mostrado que a qualidade do agregado é um dos importantes fatores limitadores tanto para a obtenção de uma boa trabalhabilidade quanto de uma alta resistência.

### **2.3 Importância da qualidade dos agregados graúdos para o emprego em concretos de alta resistência**

A qualificação dos agregados graúdos para o emprego em concretos de alta resistência deve ser baseada, a princípio, no cumprimento e exigências prescritas nas normas atuais, para concretos convencionais, tais como: NBR 7211/1983 e NBR 12654/1992.

Para NEVILLE (1997), a resistência à compressão do concreto não pode ser significativamente maior que a maior parte do agregado, embora não seja fácil estabelecer qual é a resistência das partículas isoladamente. Levando em consideração essa dificuldade, deve-se buscar outras informações que normalmente são obtidas de forma indireta: valor da resistência ao esmagamento do agregado em fragmentos, força necessária para compactar o agregado em fragmentos e desempenho do agregado no concreto.

Para o FIP/CEB (1990), nos concretos de alta resistência a capacidade do agregado freqüentemente limita a resistência do concreto. Para um bom agregado este limite superior encontra-se entre 120 a 140 MPa. Para agregados extremamente bons, como um diabásio, de resistência em torno de 170 MPa tem sido registrada. Para agregados exóticos como bauxita calcinada, os níveis de resistência excedem a 250 MPa.



ALMEIDA (1990) relata que para produção de concreto de alta resistência a utilização de agregados graúdos de elevada resistência é condição necessária mas não suficiente e ressalta que, em alguns casos, atinge-se um limite acima do qual são infrutíferas as tentativas de elevar a resistência dos concretos com o fortalecimento de pasta através do aumento no consumo de cimento; pois o concreto rompe na zona de transição entre agregado e a pasta.

Para GJORV (1994), com os recursos atualmente disponíveis, pode-se produzir concretos com resistência muito superior às estabelecidas pelas práticas correntes de cálculo estrutural. Desde que se empreguem agregados minerais de alta qualidade, pode-se obter concretos com resistência à compressão acima de 230 MPa e ressalta ainda que, se os agregados minerais forem substituídos por agregados cerâmicos de alta qualidade, resistência na ordem de 460 MPa podem ser alcançadas.

HELLAND, apud GOMES (1995), ao estudar o comportamento dos concretos com vários níveis de resistência à compressão nos quais foram usados agregados de boa qualidade – seixo britado – concluiu que:

- nas resistências abaixo de 80 MPa o concreto se comporta como um material tipicamente composto; as primeiras fissuras se desenvolvem na pasta e na ligação entre a pasta e o agregado;
- para resistência entre 80 e 100,0 MPa, as fissuras iniciais começam a penetrar nos agregados e o concreto torna-se material homogêneo, onde a capacidade de carga da pasta e do agregado passam a ser da mesma ordem;
- acima da resistência de 100 MPa, o agregado é o primeiro componente a fissurar e o concreto volta a comportar-se como material composto.

## **2.4 Influência da forma e da textura do agregado graúdo no desempenho à compressão nos concretos de alta resistência**

A norma francesa AFNOR P-18-301 define um coeficiente que caracteriza a forma dos grãos:  $c = v/(\pi L^3/6)$ , onde  $v$  é o volume da amostra (determinado em frasco graduado) e  $L$  a maior dimensão do agregado. Essa norma fixa os valores mínimos de coeficiente volumétrico médio dos agregados graúdos para os diferentes tipos de concreto:

- concretos estruturais armados e de baixa permeabilidade (barragens, reservatórios e obras marítimas):  $c = 0,20$
- concretos pouco ou não armados (blocos e maciços de fundação):  $c = 0,15$

No Brasil, para determinação da forma dos agregados, existe a NBR 7809/1983 onde se estabelece que os agregados tenham em média a relação entre o comprimento e a espessura inferior a 3.

Para NEVILLE (1997), a forma do agregado está relacionada com a extratificação e a clivagem da rocha-mãe e também é influenciada pelo equipamento de britamento, no caso de redução de rochas artificiais. Partículas com elevada relação entre área superficial e volume apresentam um interesse particular porque aumentam a demanda de água para uma dada trabalhabilidade do concreto.

A forma dos grãos do agregado graúdo influi na qualidade do concreto ao lhe alterar a trabalhabilidade, afetando, em consequência, as condicionantes do bombeamento, lançamento e adensamento. A trabalhabilidade do concreto fresco determina a facilidade com que ele pode ser manipulado sem secreção nociva. Um concreto que seja difícil de lançar e adensar não só aumentará o custo de manipulação como também terá resistência, durabilidade e aparência inadequadas.

Conforme MEHTA (1994), os concretos de alta resistência deverão ser produzidos, preferencialmente, com agregados graúdos com coeficiente volumétrico superior a 0,20. Os grãos irregulares possuem maior superfície específica que os cubóides e, em

consequência, os concretos necessitarão de um traço mais rico em finos e maior quantidade de água de amassamento. Como resultado ocorre aumento no teor de cimento e gera-se um concreto mais dispendioso. Além de que, agregados com forma de agulha ou disco com reduzidas seções transversais podem romper com maior facilidade e, conseqüentemente, serem limitadores da resistência à compressão do concreto.

Para NEVILLE (1997), a forma equidimensional das partículas é preferível porque as partículas cuja forma se afasta desse formato têm maior área superficial e se acomodam de modo anisotrópico. As partículas lamelares tendem a se orientar segundo um plano, com exsudação e bolhas de ar se acumulando sob elas e, assim sendo, podem prejudicar a resistência e a durabilidade dos concretos de alta resistência.

Tem sido observado que a mistura de concreto contendo agregado de textura rugosa ou britado apresentará maior resistência, especialmente à tração, nas primeiras idades que um concreto correspondente contendo agregado liso ou que sofreu intemperismo natural, de mineralogia ou similar. Uma ligação física mais forte entre o agregado e a pasta de cimento endurecida é admitida como responsável por esse fato. Em maiores idades a influência da textura superficial do agregado sobre a resistência poderá reduzir-se (MEHTA, 1994).

A textura superficial dependa da dureza, granulação e características dos poros da rocha-mãe, bem como do grau com que as forças atuantes na superfície das partículas tenham-nas tornado lisas ou ásperas.

Aparentemente, a forma e a textura do agregado têm considerável influência sobre a resistência do concreto. A resistência à flexão é mais influenciada que a resistência à compressão e os efeitos de forma são mais significativos em concretos de alta resistência.

Para NEVILLE (1997), ainda não é completamente conhecido o papel da forma e da textura do agregado na evolução da resistência do concreto, mas possivelmente uma textura mais áspera resulte em maiores forças de aderência entre as partículas e a matriz de concreto. Contudo, os resultados de KAPLAN, Apud NEVILLE (1997), não

confirmam que a textura superficial seja um fator determinante na aderência entre agregado e zona de transição.

Na literatura internacional há poucos trabalhos que tratam da influência da forma e da textura dos agregados graúdos nos concretos de alta resistência, contudo parece haver consenso de que a textura rugosa melhora a resistência à tração e a resistência à compressão nas primeiras idades.

A quantidade de água de molhagem necessária a uma dada mistura é influenciada pela superfície dos agregados, que está intimamente vinculada à granulometria, à forma, à textura e à capacidade de absorção. Assim, a quantidade de material incorporada à mistura para uma dada relação água/cimento e consistência é afetada pelo tamanho, forma, textura superficial e granulometria dos agregados, alterando sobremaneira seu custo. Portanto, para MEHTA (1994), é impróprio tratar os agregados com menos respeito que os cimentos.

### **2.5 Influência da dimensão máxima característica do agregado graúdo na resistência à compressão nos concretos de alta resistência**

Inicialmente, faz-se necessário considerar que, além do aspecto econômico, há outros fatores que governam a escolha da dimensão máxima característica do agregado graúdo para uma mistura de concreto. Nesse sentido a NBR 6118/1978 estabelece que a escolha deve ser tal que obedeça aos seguintes critérios:

$DMAX \leq 1/3$  da espessura da laje;

$DMAX \leq 1/4$  da distância entre as faces das fôrmas;

$DMAX \leq 0,8$  do espaçamento entre armaduras horizontais;

$DMAX \leq 1,2$  do espaçamento entre armaduras verticais;

$DMAX \leq 1/4$  do diâmetro da tubulação de bombeamento de concreto e explicita para que se adote o menor dos valores.

Para NEVILLE (1997), deve-se evitar partículas grandes porque elas introduzem heterogeneidades no sistema, pois na interface pode haver incompatibilidade entre o agregado e a pasta de cimento quanto ao módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, retração, fluência e propriedades térmicas. Essa incompatibilidade pode levar à microfissuração mais intensa quando o agregado possui dimensão máxima maior do que 10 ou 12 mm. MEHTA (1994) afirma que, para concretos de alta resistência, a dimensão máxima do agregado graúdo deve ser limitada em 19,0 mm e defende a tese que partículas maiores tendem a produzir microfissuras na zona de transição entre o agregado graúdo e a pasta de cimento.

Muitos estudos têm mostrado que para uma ótima resistência à compressão, com elevada quantidade de cimento e baixas relações água/cimento, o tamanho máximo do agregado graúdo poderia ficar no mínimo em 12,7 mm ou 9,5 mm. Contudo, tamanhos máximos de 19,0 mm e 25,0 mm tem sido usados com sucesso. CORDAM e GILLEPIE apud ACI-363-R (1992) acreditam que o aumento da resistência foi causada pela redução da tensão média de ligação devido ao aumento da área superficial dos agregados.

Os agregados com maior dimensão máxima característica, face à redução da área específica, poderão necessitar de menor quantidade de água na mistura permitindo uma redução na relação água/materiais cimentantes, quando mantido o consumo, ou conduzir a uma redução no consumo de material cimentante, pela inclusão de maior quantidade de agregados, quando mantida a relação água/materiais cimentantes.

Os agregados graúdos com menor dimensão máxima característica são potencialmente menos microfissurados e, provavelmente, isentos de fracas inclusões minerais. Essas características dificultam a ruptura prematura e propiciam a utilização desses agregados nos CAR. Além disso, tais alterações granulométricas provocam significativas mudanças na estrutura interna do concreto. Os espaços entre os agregados são reduzidos, as fissuras, ao redor dos grãos, originam-se em estágios mais avançados de carregamento e, devido à proximidade entre as fissuras, há maior probabilidade de que

as mesmas se interliguem e aumente-se o percurso médio das fissuras. Contudo, essas vantagens reunidas não são fortes o suficiente para invalidarem e/ou excluírem a utilização de agregados graúdos com dimensão máxima característica de 19,0 ou 25,0 mm.

Ao se produzirem concretos de alta resistência empregando agregados graúdos de menor dimensão máxima característica, amplia-se a energia de ligação entre estes e a matriz do concreto. O ganho é devido ao significativo aumento de superfície – maior número de ligação agregado e matriz. Contudo, se as solicitações entre a pasta e o agregado forem muito menores que a resistência oferecida pela zona de transição, parece em não haver inconveniente em aumentar-se a dimensão máxima característica do agregado graúdo. Entretanto, essa regra não é geral porque, na grande maioria das vezes, os agregados com maior dimensão máxima característica apresentam-se mais microfissurados, ou com inclusões minerais, ou parcialmente alterados. Para certificar-se da efetiva qualidade do agregado com maior dimensão máxima característica é prudente elaborar misturas de concretos com as mesma relações água/materiais cimentantes e a mesma trabalhabilidade.

Os agregados graúdos com menor dimensão máxima característica são potencialmente menos microfissurados e, provavelmente, isentos de fracas inclusões minerais. Essas características dificultam a ruptura prematura e propiciam a utilização desses agregados nos CAR. Além disso, tais alterações granulométricas provocam significativas mudanças na estrutura interna do concreto. Os espaços entre os agregados são reduzidos, as fissuras ao redor dos grãos originam-se em estágios mais avançados de carregamento e, devido à proximidade entre as fissuras, há maior probabilidade de que as mesmas se interliguem e aumente-se o percurso médio das fissuras (ALMEIDA, 1990). Contudo, é possível que essas vantagens reunidas não são fortes o suficiente para invalidarem e/ou excluírem a possibilidade da utilização de agregados graúdos com dimensão máxima característica de 19,0 ou 25,0 mm.

GONÇALVES (1994), empregando diferentes agregados graúdos com dimensões máximas características de 25,0 , 19,0 e 9,5 mm obteve resultados que vão de encontro às atuais recomendações. As resistências alcançadas com o emprego desses materiais foi respectivamente 100,6 MPa, 82,6 MPa e 80,8 MPa de forma que, ao se tratar da

dimensão máxima característica do agregado para o emprego em concreto de alta resistência, deve-se ter presente simultaneamente a mineralogia do agregado. Os agregados empregados no referido trabalho foram respectivamente: traquito, calcário e quartzo.

AITCIN e ALBINGER (1989), apud Pereira Neto (1995) evidenciam a influência da dimensão máxima característica no CAR ao produzir misturas com relações água/materiais cimentantes = 0,22, empregando seixo rolado com dimensões máximas de 10 e 20 mm e obtendo concretos com resistências, aos 91 dias, de 145 e 126 MPa, respectivamente.

Com base nos resultados obtidos por PEREIRA NETO (1995), pode-se constatar que, para alguns tipos de agregados (granito e gnaisse), tem-se ganho de resistência com o aumento da dimensão máxima característica e que, com outros agregados (basalto e diabásio), tem-se perda de resistência.

## **2.6 Influência da mineralogia, da resistência à compressão e do módulo de elasticidade das rochas dos agregados graúdos na resistência à compressão nos concretos de alta resistência**

ALMEIDA (1990), analisando o desempenho à compressão de concretos produzidos com os mesmos consumos de cimento, mas com diferentes agregados graúdos (granitos X calcários), constatou que os concretos produzidos com agregados graníticos apresentam maior resistência e atribuiu esse fato à menor demanda de água de molhagem por parte dos granitos (redução na relação água/cimento). Essa menor quantidade de água de mistura foi atribuída, entre outros fatores, à menor absorção dos granitos em relação aos calcários.

AİTCIN, SARKAR e YAYA, apud AİTCIN e MEHTA (1990), ao produzirem concretos com três diferentes agregados graúdos – calcário cálcico, calcário dolomítico, e seixo quartzítico – e relação água/cimento de 0,24, encontraram, aos 90 dias de idade, resistências de 93, 103 e 83 MPa, respectivamente. Os autores observaram que, devido

às relações na interface – agregado/pasta – a energia de ligação foi maior nos concretos produzidos com agregados de calcários.

Para analisar o efeito das características dos agregados nas propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência, AİTCIN e MEHTA (1990) produziram concretos com quatro tipos de agregados graúdos: seixo rolado, diabásio, calcário britado e granito. Todos os concretos foram produzidos com 500 Kg/m<sup>3</sup> de cimento; 42 Kg/m<sup>3</sup> de sílica ativa condensada; 10,6 l/m<sup>3</sup> de superplastificante; 675 Kg/m<sup>3</sup> de areia, com módulo de finura de 2,7; 1130 Kg/m<sup>3</sup> de agregado graúdo; e 137,5 Kg/m<sup>3</sup> de água – relação água/materiais cimentantes = 0,275.

Os corpos de prova foram ensaiados à compressão diametral nas idades de 28 e 56 dias e os resultados encontram-se na tabela 2.1.

Tabela 2-1 Resultado dos ensaios de resistência à compressão a/(c+sa)= 0,275

Resistência em MPa.				
Idade (dias)	Diabásio	Calcário	Seixo-rolado	Granito
28	100,7	97,3	92,1	84,4
56	104,8	101,3	95,9	88,6

Os concretos produzidos com agregados graníticos apresentam os menores valores de resistência e as possíveis justificativas para esse fato são as seguintes:

- os agregados graníticos possuíam maior dimensão máxima característica - 14,0 mm – enquanto os demais possuíam dimensão máxima característica de 10,0 mm;
- presença de minerais de “laumontite” o qual é formado pela alteração dos feldspatos.

Nos estudos realizados por BAALBAKI, BENMOKRANE, CHAALLAL E AİTCIN (1991) sobre a influência dos agregados graúdos nas propriedades elásticas do concreto de alta resistência foram empregados três diferentes agregados graúdos – calcário, quartzito e arenito – e mesma relação água/materiais cimentantes – 0,27-. Todos os concretos possuíam a mesma composição, exceto a massa dos agregados, a qual foi



ajustada para se obter a mesma composição volumétrica. Os agregados graúdos utilizados possuíam granulometria de 5 a 10,0 mm. Nesse trabalho os autores empregaram areia natural de origem fluvioglacial, com módulo de finura de 2,3. Em todas as misturas foi usado cimento ASTM tipo III e sílica ativa. A quantidade de superplastificante foi ajustada para obter-se trabalhabilidades similares, ou seja, um abatimento no tronco de cone ao redor de 200 mm.

As propriedades das rochas, tomadas nas três direções, são apresentadas na tabela 2-2 e a tabela 2-3 apresenta a resistência à compressão dos concretos produzidos com agregados a partir dessas rochas.

Tabela 2-2 Propriedades físicas e mecânicas de algumas rochas

	Calcário	Quartzito	Arenito
Resistência à compressão, (MPa) <sup>(a)</sup>	115 ± 7	87 ± 9	147 ± 6
Módulo de elasticidade, (GPa) <sup>(b)</sup>	49 ± 2	42 ± 2	40 ± 2
Coeficiente de Poisson	0.16	0.14	0.01
Resistência à tração, (MPa) <sup>(c)</sup>	12.0 ± 1.2	4.0 ± 0.8	7.4 ± 1.0
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	2.79	2.66	2.56
Porosidade, (%)	1.0	2.7	6.4

n= número de amostras: (a) n= 6; (b) n= 3; (c) n= 7

A tabela 2.3 apresenta os resultados da resistência à compressão e do módulo de elasticidade de concretos produzidos com agregados graúdos de diferentes mineralogias.

Tabela 2-3 Resultado dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade de concretos produzidos com diferentes agregados graúdos

Resistência dos concretos à compressão (MPa)					Módulo de elasticidade (GPa)	
Idade em dias	1	7	28	91	28	91
Quartzito	59.4	70.5	90.8	99.3	42	45
Calcário	59.9	78.2	98	106	40	44
Arenito	65.4	86	102	116	31	31

Através da análise dos resultados, pode-se notar que a mineralogia do agregado graúdo influencia no desempenho à compressão do concreto a partir do primeiro dia, ficando melhor definida com o tempo, (91 dias). Percebe-se a interdependência entre o módulo de elasticidade da rocha-mãe e o módulo de elasticidade dos concretos produzidos com agregados obtidos a partir do britamento da referida rocha. Além disso, constatou-se também a relação de proporcionalidade entre a resistência à compressão da rocha de origem e a resistência à compressão dos concretos elaborados com agregados oriundos dela.

Analizando os resultados encontrados por GIACCIO, ROCCO, VIOLINI, ZAPPITELLI (1992), quando da utilização de três diferentes agregados graúdos – granito, basalto e calcário – com dimensão máxima característica de 19,0 mm e mesmas granulometrias, pode-se chegar a conclusões semelhantes às encontradas por BAALBAKI et alli (1991), ou seja, de uma forte relação entre a resistência das rochas e a resistência à compressão dos concretos, além da forte relação entre os módulos, como se pode ver na tabela 2-4. Todas as misturas foram produzidas com relação água/cimento de 0,30; cimento ASTM tipo III; agregado miúdo areia natural com módulo de finura de 2,6 e massa específica de 2,63. Todas as misturas apresentaram trabalhabilidade medida pelo abatimento do tronco de cone de 220 mm.

Tabela 2-4 Relação entre as propriedades das rochas e dos concretos

<i>Propriedades das rochas</i>			<i>Propriedades dos concretos</i>		
Resistência à compressão (MPa)			Resistência à compressão (MPa)		
Basalto	Granito	Calcário	Basalto	Granito	Calcário
160.0	114.0	70.0	91.9	80.0	61.9
<i>Módulo de elasticidade (GPa)</i>			<i>Módulo de elasticidade (GPa)</i>		
90.0	52.0	85.0	55.4	42.4	46.1

É importante ressaltar que na produção de referidos concretos não se empregou sílica ativa, o que resultou em menores níveis de resistência.

Analizando os resultados dos ensaios obtidos por PEREIRA NETO (1995), não é possível constatar uma forte proporcionalidade entre as resistências das rochas e as

resistências dos concretos obtidos a partir dessas rochas. Além disso, não foi possível verificar forte correlação entre o módulo de elasticidade da rocha e módulo de elasticidade do concreto. Pode-se, entretanto, atribuir essas fracas correlações ao tamanho das amostras ou a dispersão dos dados. Em assim sendo, pode-se afirmar que esses dados não são suficientemente fortes para contraporem os resultados obtidos por BAALBAKI et alli (1991).

É importante salientar que os resultados dos ensaios de resistência à compressão das rochas varia com a direção dos esforços e que, em essência, o ensaio de compressão mede a qualidade da rocha mãe mas não propriamente a qualidade dos agregados usados no concreto. Para NEVILLE (1997), um bom valor médio de resistência à compressão do agregado é cerca de 200 MPa, mas muitos agregados excelentes têm resistência de até 80 MPa.

Em trabalho apresentado por GONÇALVES (1994), sobre a influência do tipo de agregado graúdo nas propriedades do concreto de alta resistência, foram empregados cinco tipos de agregados graúdos: calcário, gnaiss, granito, traquito e seixo rolado. Todas as misturas foram produzidas com relação água/materiais cimentantes igual a 0,30 e com trabalhabilidade medida no tronco de cone de  $70 \pm 10$  mm. O teor de sílica ativa utilizado em todas as misturas foi de 10 % em substituição ao cimento. As características das rochas, agregados e concretos são apresentados na tabela 2.5 .

Tabela 2-5 Relações entre as características dos agregados e as características dos concretos

	Gnaiss	Traquito	Granito	Calcário	Quartzo
Dimensão máxima (mm)	25.0	25.0	25.0	19.0	9.5
Massa específica (Kg/dm <sup>3</sup> )	2.73	2.39	2.60	2.77	2.55
Índice de forma	2.2	2.7	1.5	2.6	1.7
Resistência das rochas (MPa)	76.6	178.3	<b>78.5</b>	95	<b>110</b>
Slump (mm)	60	70	60	65	135
Resistência aos 28 dias em MPa	79.8	90.7	82.0	73.2	71.8
Resistência aos 90 dias em MPa	90.0	100.6	<b>92.0</b>	82.6	<b>80.8</b>

Nesse trabalho não foi possível verificar a forte relação, mostrada nos trabalhos anteriores, de proporcionalidade entre resistência e módulo de deformação da rocha e resistência e módulo de deformação do concreto, ainda que nos concreto produzidos com agregados graúdos de dimensão máxima de 25,0 mm fosse possível constatar a proporcionalidade entre a resistência da rocha e a resistência do concreto. Além disso, pode-se verificar que nas misturas de concreto produzidos com agregado graúdo de quartzo a resistência à compressão foi menor que nas misturas produzidas com agregados de granito e de calcário, ainda que as rochas desses agregados (granito e calcário) tivessem menor resistência à compressão e maior dimensão máxima característica.

Foi possível constatar também que os concretos produzidos com agregados de menor dimensão máxima característica não apresentaram melhor desempenho de resistência à compressão, provavelmente porque os agregados foram obtidos a partir de diferentes rochas e tinham diferentes índices de forma e as misturas foram produzidas com diferentes trabalhabilidades.

Em se considerando as várias pesquisas realizadas, verificou-se, em alguns casos, que concretos elaborados com agregados de rochas de elevada resistência apresentaram resistência inferior a rocha de origem e em outros casos não. Pode-se comprovar, em alguns casos, que quando os concretos foram produzidos com agregados de rochas de média resistência, apresentaram desempenho superior à resistência da rocha de origem. Constatou-se que para determinados agregados a redução na dimensão máxima característica foi benéfica ao desempenho dos CAR, mas com outros casos gerou tanto aumento no consumo de material cimentante quanto queda na resistência.

Analisando os vários trabalhos pôde-se constatar a existência de fraca correlação entre a resistência à compressão das rochas e a resistência à compressão dos concretos produzidos usando os agregados dessas rochas. Como mostra a figura 2.1.

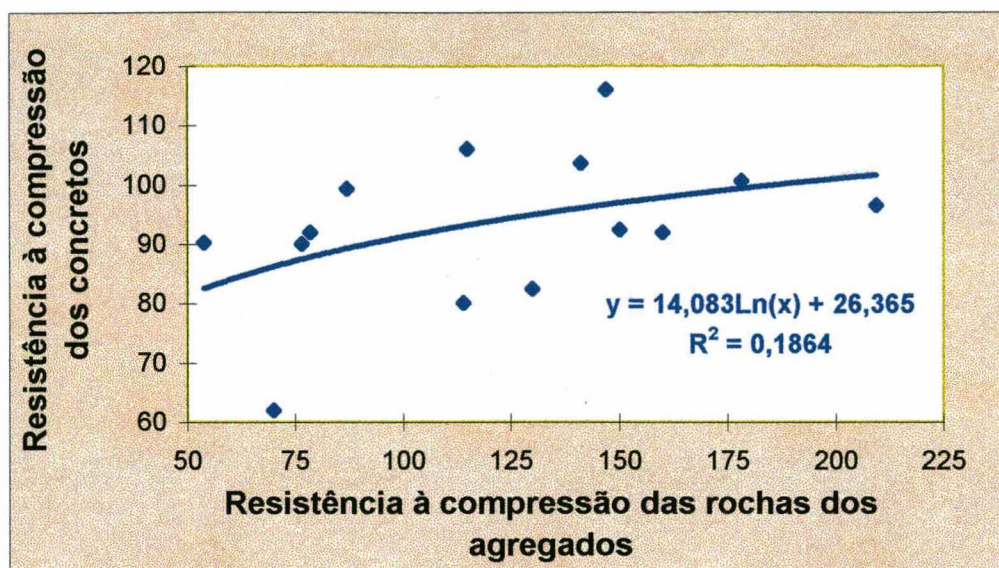


Figura 2-1 Gráfico da correlação entre a resistência à compressão das rochas-mãe e a resistência à compressão dos concretos

Com essas informações, reforça-se a necessidade de analisar o desempenho dos agregados graúdos de forma direta, ou seja, a partir da eficiência desses nos CAR. Constata-se a dificuldade em se extrapolar resultados de pesquisas de outras localidades para a região de Florianópolis. De forma que, em não se conhecendo os intervalos de resistência possíveis de serem alcançados com um determinado tipo de agregado, é conveniente verificar entre os agregados disponíveis quais os mais apropriados (econômicos) à produção de concretos de alta resistência. Essa necessidade foi percebida rapidamente em vários centros de pesquisa – São Paulo, Brasília, Porto Alegre, Rio de Janeiro, Belo Horizonte, Salvador e Santa Maria – e, quase que imediatamente, foram desenvolvidas pesquisas experimentais que tinham como objetivo principal determinar o desempenho de concretos produzidos com os agregados disponíveis em cada região. Todos estes trabalhos foram bastante úteis. Entretanto, em muitos casos, foram elaborados com agregados que possuem mineralogias e características muito diferentes das existentes em cada região da Grande Florianópolis, (basaltos densos, gnaisses, arenitos) ou foram produzidos empregando cimentos que não são disponíveis em nosso mercado (CPII-E-32, ou CPIII-40), ou limitaram-se ao emprego de um determinado consumo de cimento, aproximadamente 500 Kg/m<sup>3</sup>, ou empregaram apenas uma granulometria, etc.

A inaplicabilidade desses dados evidencia a necessidade de se desenvolver uma pesquisa com os principais agregados graúdos disponíveis na Grande Florianópolis, empregando diferentes granulometrias, diferentes relações água/materiais cimentantes e usando cimento disponível no mercado local. A importância e urgência desta pesquisa é reforçada, basicamente, pelas peculiaridades da Grande Florianópolis, que por suas características climatológicas e particularidades do desenvolvimento urbano tende a expandir-se ao redor e/ou próximo à orla marítima e assim, apresenta elevada capacidade potencial para a utilização dos concretos de alta resistência.



## Capítulo 3: Metodologia

### 3.1 Introdução

A metodologia de desenvolvimento da pesquisa compreendeu das seguintes etapas:

- a) definição da localização geográfica dos locais de onde foram retiradas as amostras das rochas;
  - b) retirada de amostras de rochas sãs, em cada uma das pedreiras;
  - c) caracterização petrográfica das rochas;
  - d) caracterização física dos agregados graúdos;
  - e) caracterização dos agregados miúdos;
- ensaios de caracterização dos cimentos (físicos, químicos e mecânicos);
- f) ensaios de caracterização da sílica ativa;
- ensaios de caracterização dos aditivos plastificantes e superplastificantes;
- g) separação dos agregados graúdos em função da forma (dois tipos de agregados);
- produção das misturas de concreto;
- h) moldagem dos corpos de prova para análise da influência da forma dos agregados no desempenho dos CAR;
  - i) produção das misturas de concreto e moldagem dos corpos de prova para verificar a influência do diâmetro máximo e do tipo de agregado granítico no desempenho dos concretos à compressão;

j) ensaio dos corpos de prova de concreto.

## **3.2 Caracterização dos materiais, processos e equipamentos empregados na pesquisa**

### **3.2.1 Agregados**

Foram estudados três diferentes tipos de granito, os quais foram denominados de granito 1, granito 2, granito 3 e diabásio.

#### **3.2.1.1 Dimensões máximas características**

Na produção dos concretos foram empregados agregados graúdos com diâmetros máximos de 25,0; 19,0 e 12,5 mm. Foram escolhidas essas dimensões máximas características porque, para GJORV (1994), a dimensão máxima característica do agregado graúdo para produção de concretos de alta resistência, oscila de 10 a 14 mm, e para MEHTA e MONTEIRO (1994) esse valor pode chegar a 19 mm e, finalmente para a FIP/CEB (1990) tais valores podem atingir 25,0 mm.

#### **3.2.1.2 Forma dos agregados**

Par que fosse possível verificar a existência ou não da influência da forma dos agregados graúdos no desempenho dos CAR à compressão, resolveu-se separar (manualmente) os agregados em três diferentes formas, que denominaram-se de lamelar, “in natura” e cúbica.

### **3.2.2 Cimento**

Após a análise dos resultados fornecidos pela indústria de ensaios físicos, químicos e mecânicos dos últimos 12 meses, optou-se pelo cimento CPI-32, que apresentou muito boa uniformidade.



### 3.2.3 Relações água/materiais cimentantes

Para obter concretos com níveis de resistência entre 60 a 100 MPa, produziram-se misturas com três diferentes relações água/materiais cimentantes (0,28; 0,33; 0,40), (incluindo nessas relações a parte líquida dos plastificantes e superplastificantes).

### 3.2.4 Teor de argamassa

Os teores de argamassa foram determinados experimentalmente, já que os mesmos foram escolhidos em função das características dos agregados. Para essa determinação adotou-se o seguinte critério: inicialmente, empregou-se 50 % de argamassa, posteriormente foi-se incrementado os teores de 2 em 2 % até obter-se a trabalhabilidade de  $80 \pm 20$  mm.

### 3.2.5 Trabalhabilidade

Para cada uma das relações água/materiais cimentantes, para cada um dos agregados e para cada granulometria, foi adotado, inicialmente, um traço que permitisse à mistura trabalhabilidade muito acima da estabelecida; posteriormente, foi-se adicionado agregados até alcançar a trabalhabilidade pré-estabelecida de  $80 \pm 20$  mm.

### 3.2.6 Idades dos ensaios

Os corpos de prova foram ensaiados nas idades de 3, 7 e 28 dias, visando a acompanhar as evoluções de resistência dos diferentes concretos.

### 3.2.7 Número de corpos de prova

Para cada uma das variáveis estudadas foram moldados quatro corpos de prova, sendo que para esta análise apenas os dois maiores resultados foram considerados. Esse procedimento baseia-se no fato de que as maiores variações foram provenientes, quase

que exclusivamente, dos erros de ensaio e não dos de produção. Assim sendo, os dois maiores valores de resistência refletem com maior nitidez a qualidade intrínseca do concreto.

### **3.2.8 Teor de sílica ativa**

Para produção desses concretos, empregou-se 10 % de sílica ativa em relação à massa de cimento, em substituição ao cimento. Isso porque, conforme MEHTA e MONTEIRO (1994), ganhos efetivos de resistência à compressão e à tração podem ocorrer com teores de sílica ativa na faixa de 8 a 12 %.



### **3.2.9 Teor de plastificante e superplastificante**

Empregou-se 0,5 % de plastificante à base de lignosulfato de sódio, com teor de sólidos igual a 20 %, e 3 % de superplastificante à base de condensados melamina sulfonados, MSF, com teor de sólidos de 37 % em relação à quantidade de cimento empregada em cada uma das misturas. Foram adotados esses percentuais após extenso trabalho experimental.

## **3.3 Localização das pedreiras**

É importante elucidar que esta pesquisa se restringiu aos seguintes locais: BIGUAÇÚ (Pedreira Sul-Catarinense), FORQUILHINHA (Pedreira Saibrita), e RIO TAVARES (Pedreira Pedrita). Foram escolhidas essas pedreiras porque nessas os agregados apresentavam-se mais homogêneos e, conseqüentemente, mais adequados à investigação. Entretanto, ressalta-se que em uma das pedreiras os agregados de granito e diabásio eram britados simultaneamente, como se pode ver na figura 4.1 e, em outra, vários tipos de granitos eram britados concomitantemente; a figura 4.2 auxilia o entendimento.



	
Figura 3-1 Foto das rochas de granito e basalto que foram britados simultaneamente	Figura 3-2 Foto demonstrativa da heterogeneidade dos granitos

3.4 Número e local de coleta das amostras

As amostras foram coletadas junto aos britadores primários de cada uma das pedreiras. A tabela 3-1 explicita o número e a denominação dada às amostras.

Tabela 3-1 Número de amostras de rochas por pedreira investigada

Pedreira	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Saibrita	S1	S2	S3
Sul-Catarinense	C1	C2	C3
Pedrita	P1	P2	P3
Pedrita (diabásio)	D1	D2	D3

### 3.5 Ensaios de caracterização das rochas

#### 3.5.1 Ensaios petrográficos

Os ensaios de caracterização petrográfica foram realizados no laboratório de Geologia do Curso de Geografia da Universidade Federal de Santa Catarina, graças à colaboração do geólogo Victor Hugo Teixeira, que é especialista na área de granitos.

##### • DIABÁSIO

Trata-se de um diabásio proveniente de um dique, da Pedreira Pedrita, no Rio Tavares, Florianópolis, de cor cinza-escuro, estrutura maciça, textura equigranular média, sendo constituído por:

- Plagioclásio cálcico sob a forma de prismas euédricos, de 0,05 a 1,5 mm, de cor cinza clara;
- Piroxênio de cor preta, formando grãos de 1 a 1,5 mm;

O piroxênio e o plagioclásio cálcico são os minerais essenciais, com leve predominância do piroxênio.

##### • GRANITO 1

Trata-se de um granito cinza-claro, estrutura maciça, textura equigranular grosseira, sendo constituído por:

- Feldspato potássico- cor rósea à cinza clara, grãos anédricos, de 0,3 a 0,7 cm, com 2 a 3 planos de clivagem bem definidos, constituindo de 50 a 60 % da rocha;
- Plagioclásio ácido- cor branca leitosa, com grãos anédricos de 0,2 a 0,5 cm, constituindo cerca de 10 a 15 % da rocha;
- Quartzo- cinza, interticial, granular, com 0,1 a 1 cm, constituindo cerca de 20 a 25 % da rocha;
- Anfibólio- preto, grão anédrico, de 0,1 a 0,5 cm, constituindo cerca de 10 a 15 % da rocha;
- Biotita- preta, forma lamelar, brilho vítreo intenso, de 0,05 a 0,1 cm, formando menos de 1 % da rocha.

Observação: Há grãos menores que o granito 2, mais plagioclásio ácido e parecem ter sofrido alterações hidrotermal ou tectonismo.



### • GRANITO 2

Trata-se de um granito cinza claro, estrutura maciça, textura inequigranular grosseira, sendo constituída por:

- Feldspato potássico- cor rósea à cinza clara, com grãos anédricos de 0,5 a 1,5 cm, com 2 a 3 planos de clivagem bem definidos, constituindo de 60 a 65 % da rocha;
- Plagioclásio ácido- cor branca leitosa, com grãos anédricos de 0,2 a 0,5 cm, constituindo cerca de 5 a 10 % da rocha;
- Quartzo- cinza, interticial, granular, com 0,2 a 0,8 cm, constituindo cerca de 15 a 20 % da rocha;
- Anfibólio- preto, com grão anédrico de 0,1 a 0,5 cm, constituindo cerca de 10 a 15 % da rocha;
- Biotita- preta, forma lamelar, brilho vítreo intenso, de 0,1 a 0,2 cm, formando menos de 1 % da rocha.

### • GRANITO 3

Trata-se de uma rocha que varia de granodiorito a quartzomonzonico, com estrutura maciça, textura equigranular médio, sendo constituído por:

- Plagioclásio ácido, cor branco-leitosa, com grãos anédricos de 0,1 a 0,4 cm, constituindo cerca de 60 a 65 % da rocha;
- Quartzo, cinza, interticial, granular, com 0,05 a 0,4 cm, constituindo cerca de 20 a 25 % da rocha;
- Feldspato potássico, cor rósea à cinza clara, grãos anédricos de 0,1 a 0,5 cm, com 2 a 3 planos de clivagem bem definidos, constituindo de 10 a 15 % da rocha;
- Anfibólio, preto, com grão anédrico de 0,05 a 0,2 cm, constituindo cerca de 10 % da rocha;
- Biotita, preta, forma lamelar, brilho vítreo intenso, de 0,05 a 0,1 cm, formando menos de 1 % da rocha;
- Hematita, cor vermelho-sangue que, quando presente, empresta à rocha uma cor rósea, ocorre de forma disseminada na rocha. Forma grãos de 0,05 a 0,1 cm, constituindo uma auréola avermelhada, ao redor do grão. Constitui de 1 a 2 % da rocha.

## COMENTÁRIOS

Os planos de clivagem são superfícies de fraqueza da estrutura do mineral, o qual tende a romper-se com maior facilidade, resultando superfícies planas. O mineral pode não ter clivagem, como o quartzo, ou ter um plano de clivagem proeminente como a biotita, e pode ainda, ter dois ou três planos de clivagem, como é o caso do feldspato potássico e o plagioclássio ácido.

### 3.6 Ensaios de caracterização dos agregados graúdos

#### 3.6.1 Introdução

Os agregados destinados aos ensaios de caracterização e à produção dos concretos foram coletados, em quantidade suficiente, em função da classificação (brita 1, brita 0, ou “3/4”) em cada um dos montes.

Nesta pesquisa utilizou-se quatro tipos de agregados graúdos, sendo três desses de origem granítica e um de origem diabásica; além disso, usou-se três dimensões máximas características: 25,0 mm, 19,0 mm, e 12,5 mm. A composição granulométrica do agregado graúdo de dimensão máxima característica de 25 mm foi constituída dos grãos que passaram na peneira de 25 mm e os que ficaram retidos na peneira de 19,0 mm; a composição granulométrica de dimensão máxima característica de 19 mm foi constituída dos grãos que passaram na peneira de 19 mm e os que ficaram retidos na peneira de 12,7 mm; a composição granulométrica de dimensão máxima característica de 12,7 mm foi constituída dos grãos que passaram na peneira de 12,7 mm e os que ficaram retidos na peneira de 9,5 mm.

Os agregados destinados aos ensaios e à produção dos concretos foram adquiridos em uma única vez e armazenados em tonéis previamente referenciados. Portanto, os agregados provenientes da Saibrita (denominados granito 1), foram depositados em tonéis pintados externamente com verde; os agregados provenientes da Sul-Catarinense (denominados granito 3), foram colocados em tonéis pintados de azul e os granitos da Pedrita (denominados granito 2), foram armazenados em tonéis pintados externamente de amarelo; já os agregados de diabásio foram armazenados em tonéis pintados



externamente de vermelho. Esses tonéis ficaram protegidos da chuva. Todos os agregados graúdos foram lavados antes do armazenamento. Dessa forma, tanto os agregados utilizados para os ensaios de caracterização quanto os empregados na produção das misturas de concreto possuíram as mesmas características.

3.6.2 Ensaio físico dos agregados graúdos

Preliminarmente, é importante lembrar que os agregados foram agrupados em intervalos granulométricos, visto que o estudo tinha como objetivo estudar os agregados em igualdade granulométrica. Portanto não teria sentido realizar o ensaio de composição granulométrica, conforme a NBR 7217.

A massa unitária foi verificada através da NBR 7810/83, NBR 7251/82. A tabela 3-2 (a) e 3-2 (b) apresentam os resultados dos ensaios de massa unitária, massa específica, absorção e coeficiente volumétrico dos diferentes agregados graúdos.

Tabela 3-2 (a) Resultado dos ensaios físicos dos diferentes agregados graúdos

Massa específica (g/cm³)				
Tipo de agregado	D.M.C. = 12.7 mm	D.M.C. =19.0 mm	D.M.C. = 25.0 mm	
Granito 1	1.451	1.448	1.445	
Granito 2	1.409	1.432	1.431	
Granito 3	1.410	1.440	1.405	
diabásio	1.502	1.576	1.518	
Massa específica dos agregados graúdos				
Tipo de agregado	Granito 1	Granito 2	Granito 3	Diabásio
Massa específica (g/cm³)	2.693	2.638	2.605	2.986
Absorção dos agregados graúdos				
Tipo de agregado	Granito 1	Granito 2	Granito 3	Diabásio
Absorção (%)	0.563	0.433	0.332	0.220

Tabela 3.2 (b) Resultado dos ensaios físicos dos diferentes agregados graúdos

Coeficiente volumétrico dos agregados graúdos com D.M.C = 19,0 mm.				
Tipo de agregado	Granito 1	Granito 2	Granito 3	Diabásio
Coeficiente volumétrico	0.236	0.266	0.187	0.164
Forma “lamelar”			0.139	0.152
Forma “cúbica”			0.286	0.252

### 3.7 Ensaio de caracterização dos agregados miúdos

A areia utilizada foi comprada de um único fornecedor e de uma só vez. Para a produção dos concretos a areia foi previamente seca em estufa e estocada em tonéis no interior do laboratório, em local seco e protegido.

Foram examinadas as seguintes características dos agregados miúdos:

#### 3.7.1 Composição granulométrica

A granulometria dos agregados miúdos foi determinada em conformidade com a NBR 7217/87, e os resultados são expressos nas tabela 3.3 (a) e (b).

Tabela 3-3 (a) Apresentação dos resultados dos ensaios de granulometria

Amostra 1 (1000 gramas)			
Peneira (mm)	Material retido (g)	% retida	% retida acumulada
6,3	11,7	1,17	1,17
4,8	17,51	1,75	2,921
2,4	115,28	11,53	14,449
1,2	202,52	20,25	34,701
0,6	240,6	24,06	58,761
0,3	187,5	18,75	77,511
0,15	168,88	16,89	94,399
Fundo	55,93	5,59	99,992
	999,92	Mód. Finura	2,827



Tabela 3-3 (b) Apresentação dos resultados dos ensaios de granulometria

Amostra 2 (1000 gramas)			
Peneira (mm)	Material retido (g)	% retida	% retida acumulada
6,3	14.4	1.44	1.44
4,8	17.1	1.71	3.15
2,4	114.2	11.42	14.57
1,2	207.5	20.75	35.32
0,6	242.6	24.26	59.58
0,3	184.4	18.44	78.02
0,15	164.8	16.48	94.5
Fundo	55	5.5	100
		Mód. Finura	2.851

Módulo de finura médio = 2.839

3.7.2 Massa unitária do agregado miúdo

A massa unitária foi determinada de acordo com a NBR 7251.  
Massa unitária média =1.510 g/cm³.

3.7.3 Massa específica do agregado miúdo

A massa unitária foi determinada de acordo com a NBR 9776.  
Massa específica média =2.575 g/cm³ .

3.8 Ensaios de caracterização do cimento

O cimento utilizado para a produção dos concretos foi o CPI-S-32, o qual foi obtido em duas remessas, sendo armazenado armazenado em barricas plásticas com fechamento hermético, depositadas no interior do laboratório.

Os ensaios químicos e físicos foram solicitados ao laboratório o qual enviou um relatório apresentados os referidos resultados. Os valores referem-se a média e ao desvio padrão anual. A tabela 3.4 apresenta o resultado dos ensaios químicos e a tabela 3.5 dos ensaios físicos.

Tabela 3-4 Resultado dos ensaios químicos do cimento

Elementos constituintes simples (%)							
Elemento	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
Média	4.45	20.24	2.45	63.53	2.86	2.26	7.65
Desvio Padrão	0.11	0.22	0.03	0.36	0.05	0.13	0.29
Características	Perda ao Fogo	CaO Livre		Resíduos Insol.		Equiv. Alcalino	
Média ( % )	3.39	1.75		0.55		0.58	
Desvio Padrão	0.11	0.21		0.12		0.03	

Tabela 3-5 Resultado dos ensaios físicos do cimento

	Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	Início de pega ( min)	Fim de pega (min)	Material retido # 200	Material retido # 325
Média	314.50	216.67	304.17	1.33	7.51
Desvio Padrão	6.57	16.42	13.11	0.44	1.63
Resistência à compressão (MPa)					
Idade	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	
Média	15.32	29.20	34.83	41.47	
Desvio Padrão	0.95	0.84	0.96	0.62	

### 3.9 Ensaio de sílica ativa

A sílica ativa empregada nesta pesquisa foi fornecida pela Silmix, sendo do tipo não condensada. A tabela 3.6 expressa as características físicas e a tabela 3.7 a composição química da sílica ativa. Os resultados dos ensaios de caracterização foram fornecidos pela própria empresa.

Tabela 3-6 Características físicas da sílica ativa

Sílica ativa Marca Silmix					
Cor	Formato	Diâmetro médio	Perda ao Fogo	Massa específica	Superfície esp.
Cinza Claro	Esférico	0.35 µm	2.30 %	2.20 g/cm <sup>3</sup>	19.00 m <sup>2</sup> /kg
Umidade ( % )			Densidade (g/cm <sup>3</sup> )		
Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima
0.42	0.67	0.84	0.32	0.40	0.52

Tabela 3.7 Composição química da sílica ativa

Composição química (%)						
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
95.10	0.09	0.10	0.24	0.43	0.93	0.23
		Mínimo	Médio		Máximo	
Valor do ph		7.40	8.47		9.40	

**3.10 Aditivos plastificantes e superplastificantes**

Tanto os aditivos plastificantes quanto os aditivos superplastificantes foram fornecidos pela empresa SIKA.

Como aditivo plastificante utilizou-se Sikament FN, a base de lignosulfonato de sódio dessacarado, com 20% de sólidos, na proporção de 0,5 % em relação à massa de cimento. Como aditivo superplastificante empregou-se o Sikament 300, condensados de formaldeído melamina sulfonatados, com 37 % de sólidos, em percentagem de 3 % em relação à massa do cimento.

**3.11 Água**

A água utilizada foi fornecida pela companhia de abastecimento local, CASAN.



**3.12 Separação dos agregados graúdos em função da forma**

Para obter-se as diferentes formas, os agregados foram selecionados visualmente e separados manualmente, em função de sua forma. Após essa separação, obteve-se dois grandes grupos de agregados: os que possuíam forma laminar e os que possuíam forma cúbica.

Devido à inexistência de métodos mais eficazes, essa seleção pode ter incorrido em erros que, a princípio, podem ser toleráveis.

As figuras 3.3 e 3.4, fornecem uma idéia mais exata desta classificação.

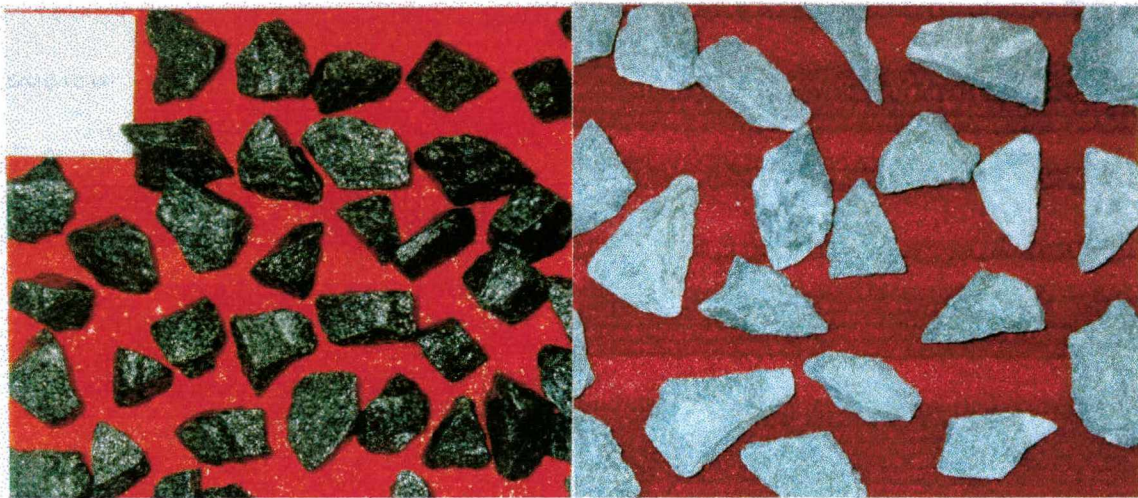


Figura 3.3 Agregado de diabásio (úmido), classificado como cúbico

Figura 3.4 Agregado de diabásio (seco), classificado como lamelar

**3.13 Influência da forma do agregado graúdo no desempenho à compressão nos concretos de alta resistência**

Para verificar a influência da forma dos agregados graúdos nos concretos de alta resistência, utilizou-se o granito 3 e o diabásio. Escolheu-se esses agregados por possuírem, “in natura”, baixos coeficientes volumétricos, ou seja, formas alongadas. A dimensão máxima adotada foi de 19,0 mm, pois dimensões mais reduzidas inviabilizariam a obtenção da quantidade de material necessário à condução do trabalho. Os agregados com dimensão máxima de 25,0 mm foram descartados pois sua utilização

é mais limitada, principalmente em peças densamente armadas. Com os três diferentes índices de forma e com a dimensão máxima característica de 19 mm, foram produzidos os concretos com teor de argamassa de 56 %, valor esse obtido experimentalmente. Fez-se, quando necessário, os ajustes na quantidade de agregado de forma a manter-se constante a trabalhabilidade dos concretos.

Os concretos, em função da forma dos agregados, foram denominados de: concreto “lamelar”, para concretos produzidos com agregados de forma lamelar; “Cúbico”, para os concretos produzidos com agregados de forma cúbica; “in natura”, para os concretos produzidos com agregados normais. Foram moldados quatro corpos de prova para cada uma das relações água materiais/materiais cimentantes, na idade de 28 dias. Foram produzidos concretos tanto com agregados de granito 3 quanto com agregados de diabásio. A tabela 3-8 apresenta esquematicamente o número de corpos de prova ensaiados na idade de 28 dias, nas diferentes relações água/materiais cimentantes, para a análise da influência da forma.

Tabela 3-8 Apresentação esquemática do número de corpos de prova a serem ensaiados na idade de 28 dias, nas direntes relações água/materiais cimentantes, para a análise da influência da forma.

Concreto produzido com granito 3, DMC = 19 mm, Idade 28 dias.			
Idade do ensaio 28 dias	Relações água/cimento		
Forma do agregado	0.28	0.33	0.4
Lamelar	4	4	4
“in natura”	4	4	4
Cúbica	4	4	4
Concreto produzido com diabásio, DMC = 19 mm, Idade 28 dias.			
Idade do ensaio 28 dias	Relações água/cimento		
Forma do agregado	0.28	0.33	0.4
Lamelar	4	4	4
“in natura”	4	4	4
Cúbica	4	4	4
Número de corpos de prova = 72			



**3.14 Influência da dimensão máxima característica e do tipo de agregado graúdo no desempenho à compressão nos concretos de alta resistência**

Para analisar a influência do tipo de agregado e da dimensão máxima característica do agregado graúdo foram moldados quatro corpos de prova para cada uma das idades investigadas, para cada tipo de agregado utilizado e para uma das relações água/materiais cimentantes. A tabela 3-9 apresenta esquematicamente o número de corpos de prova ensaiados para análise comparativa de desempenho de concretos produzidos com diferentes agregados graúdos, granulometrias e dimensões máximas e relações água/materiais cimentantes.

Tabela 3-9 Corpos de prova ensaiados utilizando agregados de granito 1 , de granito 2, de granito 3 e de diabásio.

GRA		a/(c+sa)= 0,28			a/(c+sa)=0,33			a/(c+sa)=0.40		
		Idade (dias)			Idade (dias)			Idade (dias)		
NI TO N. 1	DMC	3	7	28	3	7	28	3	7	28
	12.7mm	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	19.0 mm	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	25.0 mm	4	4	4	4	4	4	4	4	4
GRA		Idade (dias)			Idade (dias)			Idade (dias)		
		Idade (dias)			Idade (dias)			Idade (dias)		
NI TO N. 2	DMC	3	7	28	3	7	28	3	7	28
	12.7mm	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	19.0 mm	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	25.0 mm	4	4	4	4	4	4	4	4	4
GRA		Idade (dias)			Idade (dias)			Idade (dias)		
		Idade (dias)			Idade (dias)			Idade (dias)		
NI TO N. 3	DMC	3	7	28	3	7	28	3	7	28
	12.7mm	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	19.0 mm	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	25.0 mm	4	4	4	4	4	4	4	4	4
GRA		Idade (dias)			Idade (dias)			Idade (dias)		
		Idade (dias)			Idade (dias)			Idade (dias)		
DIA BÁ SiO	DMC	3	7	28	3	7	28	3	7	28
	12.7mm	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	19.0 mm	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	25.0 mm	4	4	4	4	4	4	4	4	4

Total de corpos de prova ensaiados = 424

### **3.15 Produção das misturas de concreto e método de ensaio**

#### **3.15.1 Tipo de betoneira**

A mistura foi realizada em betoneira de eixo inclinado, com capacidade de 120 litros, marca ZANNONI, em condição tão seca quanto possível, sem nenhum tipo de imprimação.

Conforme SOUZA 1992, Apud PEREIRA NETO 1995, as betoneiras com eixo inclinado podem produzir concreto com resistências de até 25 % menor que betoneiras de eixo vertical.

#### **3.15.2 Ordem de colocação dos materiais**

Inicialmente, toda a água necessária à mistura era colocada na betoneira, e em seguida era adicionado o agregado graúdo, depois o cimento, a seguir a areia, seguida da sílica ativa e, finalmente, eram colocados os aditivos plastificantes e superplastificantes.

#### **3.15.3 Tempo de mistura**

O tempo de mistura oscilou entre três e quatro minutos, dependendo da relação água/materiais cimentantes. As misturas com menor relação água/materiais cimentantes exigiram, em média, maior tempo de mistura.

#### **3.15.4 Trabalhabilidade**

Para medir a trabalhabilidade das misturas de concreto adotou-se o abatimento no tranco de cone, slump-test, em conformidade com a norma NBR 7223/82. Abatimentos na ordem de  $80 \pm 20$  mm são adequados à maioria das aplicações estruturais de concreto armado. As figuras 3.5 e 3.6 demonstram a trabalhabilidade do concreto antes e depois do aditivo plastificante e superplastificante.



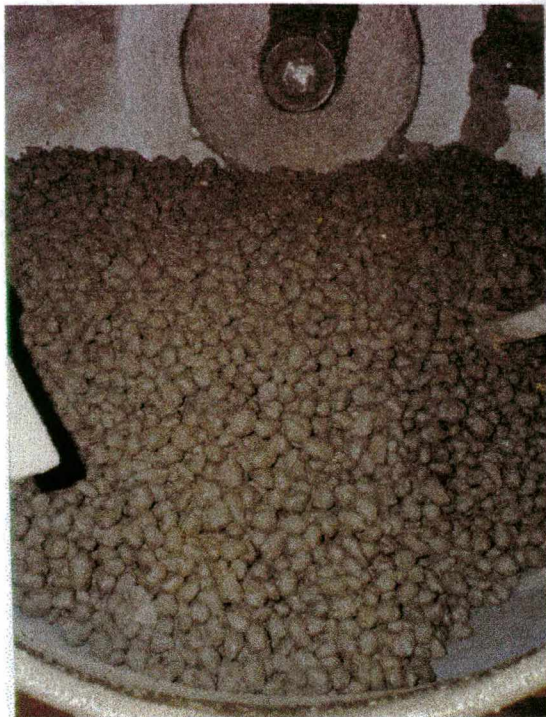


Figura 3-5 Foto do concreto antes da  
adição dos aditivos



Figura 3-6 Foto do concreto após a adição  
dos aditivos

**3.15.5 Moldagem dos corpos de prova**

Os corpos de prova foram moldados em moldes cilíndricos de 100 x 200 mm, conforme recomendação da NBR 5738/84.

**3.15.6 Adensamento**

O processo de adensamento dos corpos de prova foi mecânico, em duas camadas, e bastante enérgico, pois pretendia-se retirar ao máximo as bolhas de ar incorporado e/ou aprisionados em seu anterior. O adensamento obedeceu aos critérios exigidos pela NBR 5738/84.

**3.15.7 Desmoldagem**

Os corpos de prova foram desmoldados após 24 horas, sendo novamente identificados. Posteriormente foram deixados imersos em água saturada de cal e lá permaneceram até



4 horas antes das idades do ensaio, tempo esse necessário para a secagem superficial dos topos dos corpos de prova e para o capeamento com enxofre.

### **3.15.8 Cura dos corpos de prova**

Os corpos de prova, após a moldagem, foram etiquetados para a melhor identificação e permaneceram no ambiente do laboratório por 24 horas.

Os corpos de prova permaneceram imersos em água saturada de cal, em conformidade com a NBR 5738/84, até quatro horas antes do ensaio.

### **3.15.9 Tipo do capeamento**

Para a realização dos ensaios de resistência à compressão foi utilizado capeamento com enxofre, em conformidade com a NBR 5739/1980.

### **3.15.10 Tipo de prensa**

O ensaio de resistência à compressão axial dos corpos de prova de concreto foi realizado em conformidade com a NBR 5739/74. Para a execução do referido ensaio utilizou-se uma prensa hidráulica de marca AMSLER, com capacidade de 500 toneladas e escalas de 50, 250 e 500 toneladas, com controle de carga manual, aferida em 18/10/96. A figura 3.7 dá uma visão parcial da prensa utilizada nos ensaios.

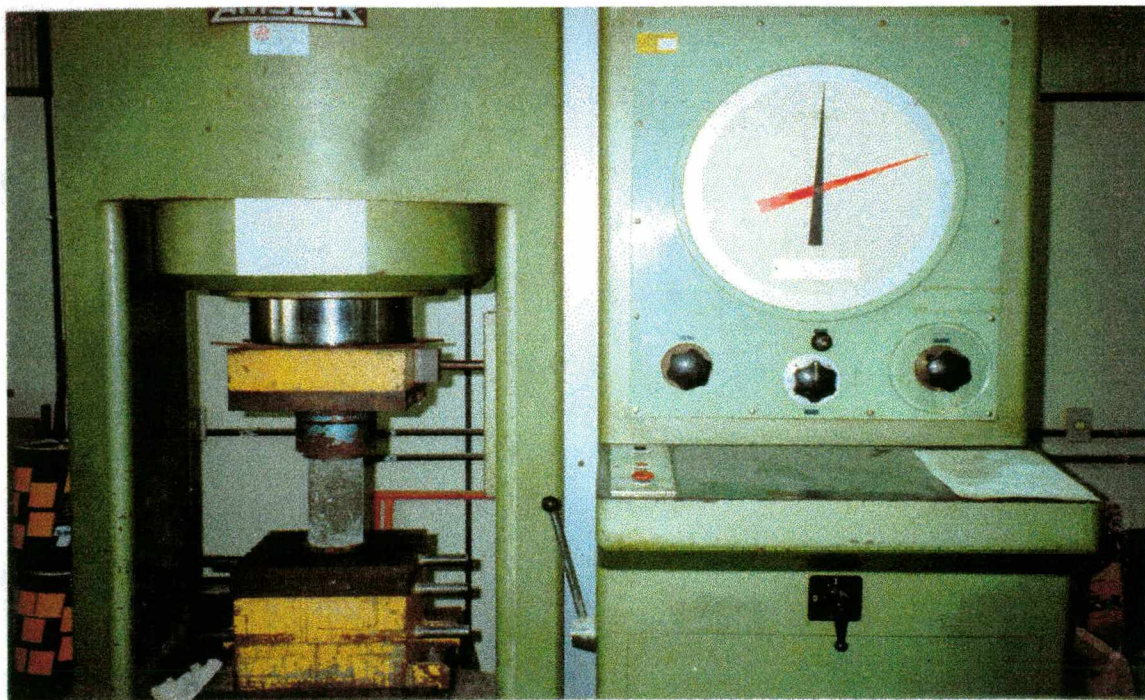


Figura 3.7 Visão parcial da prensa utilizada nos ensaios de resistência à compressão.

3.15.11 Forma de ensaiar e tipos de ruptura

Objetivando reduzir ao máxima possíveis excentricidades durante o ensaio de resistência à compressão, optou-se por utilizar uma rótula mais sensível e com dimensão adequada ao tamanho dos corpos de prova. As figuras 3.8 e 3.9 mostram a rótula utilizada e os diferentes graus de fissuração.

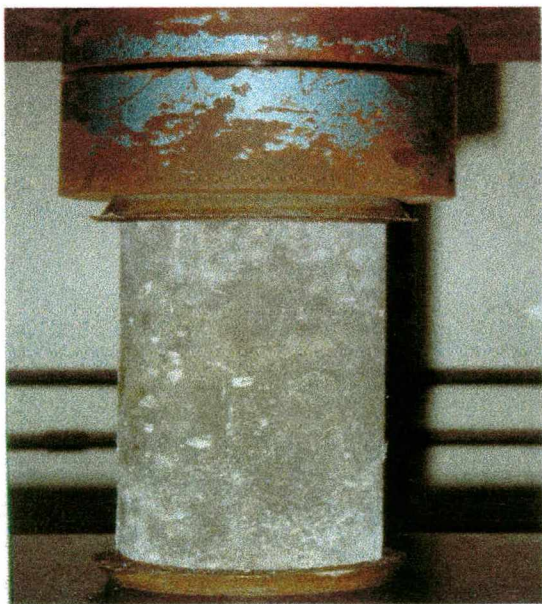


Figura 3-8 Concreto em compressão fissurando-se

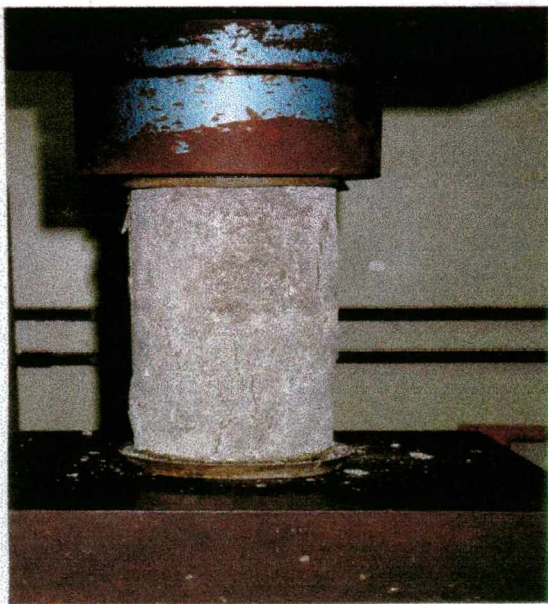


Figura 3-9 Foto com a sequência do ensaio, concreto rompendo-se



Os corpos de prova romperam, na grande maioria dos ensaios, na forma de duplo tronco de cone, como mostram as figuras 3.10 e 3.11.



Figura 3.10 Ruptura transgranular

Figura 3.11 Rupturas na zona de transição e transgranularmente

## Capítulo 4. Apresentação e análise dos resultados

### 4.1 Apresentação dos resultados

Na tabela 4-1 tem-se o resumo dos resultados dos ensaios de resistência à compressão, obtidos de concretos produzidos com diferentes agregados graúdos – em cada uma das granulometrias, relações água/materiais cimentantes e idades investigadas.

Para cada um dos agregados investigados apresenta-se uma tabela correspondente na qual constam, para cada granulometria, relação água materiais cimentantes, e idade investigada, os dois maiores valores de resistência, a média e o desvio padrão, (Tabelas de 4-2 a 4-5).

Essa forma possibilita analisar, individualmente, o desempenho de cada um dos agregados nas diferentes granulometrias, idades e relação água/materiais cimentantes.

Na Tabela 4-6 apresenta-se o resumo dos resultados dos ensaios de resistência à compressão de concretos produzidos com o mesmo tipo de agregado (granito 3 e diabásio), com dimensão máxima característica de 19,0 mm mas com diferentes coeficientes de forma.

Na página 91, expõe-se o resultado dos ensaios de resistência à compressão dos concretos produzidos com granito 2, com diferentes dimensões máximas características, relações água/materiais cimentantes igual a 0,28; 0,33 e 0,40, nas idades de 3, 7 e 28 dias. A seguir, na Tabela 4-4, da página 92, temos o resultado dos ensaios de resistência à compressão dos concretos produzidos com granito 3, com diferentes dimensões máximas características, relações água/materiais cimentantes igual a 0,28; 0,33 e 0,40, nas idades de 3, 7 e 28 dias.

Na Tabela 4-5, da página 93, apresenta-se o resultado dos ensaios de resistência à compressão dos concretos produzidos com diabásio, com diferentes dimensões máximas características, relações água/materiais cimentantes igual a 0,28; 0,33 e 0,40, nas idades de 3, 7 e 28 dias.

Finalmente, na página 94, expõe-se o resultado dos ensaios de resistência à compressão dos concretos produzidos com o mesmo tipo de agregado mas com diferentes coeficientes de forma, na idade de 28 dias.



Tabela 4-1 Resumo das resistências à compressão de concretos produzidos com diferentes agregados graúdos, diferentes dimensões máximas, diferentes relações água/materiais cimentantes, nas idades de 3, 7 e 28 dias

Agregado	Granito 1			Granito 2			Granito 3			Diabásio		
	12,7 mm	19,0 mm	25,0 mm	12,7mm	19,0mm	25,0mm	12,7mm	19,0mm	25,0mm	12,7mm	19,0mm	25,0mm
Dimensão máx.	0,28			0,28			0,28			0,28		
Rel. a/(c+sa)	Resistência (MPa)			Resistência (MPa)			Resistência (MPa)			Resistência (MPa)		
Idade 3 dias	64,87	62,05	60,05	69,39	65,25	68,69	65,32	60,92	61,75	62,68	58,76	54,49
Idade 7 dias	76,24	73,45	75,41	79,90	78,85	73,53	74,23	72,70	74,80	70,22	67,86	65,19
Idade 28 dias	95,43	92,37	95,62	99,63	93,52	99,25	92,76	87,98	83,40	88,17	78,11	72,51
Rel. a/(c+sa)	0,33			0,33			0,33			0,33		
Idade 3 dias	53,34	53,60	54,76	59,59	55,90	58,38	58,25	53,92	51,28	52,97	50,42	50,10
Idade 7 dias	66,19	62,07	68,04	70,60	70,98	70,22	66,91	69,36	65,45	64,62	59,46	57,49
Idade 28 dias	88,20	87,76	82,06	86,90	90,24	91,74	87,15	79,71	78,81	79,58	73,15	70,28
Rel. a/(c+sa)	0,40			0,40			0,40			0,40		
Idade 3 dias	40,77	42,76	45,57	41,19	45,58	47,84	43,42	45,58	41,99	42,27	46,22	39,34
Idade 7 dias	56,26	52,84	55,64	52,65	59,27	55,96	55,07	59,59	53,03	56,02	56,66	48,48
Idade 28 dias	72,89	72,07	70,54	70,66	77,29	74,29	76,46	72,51	68,69	68,82	69,07	66,30

Nota: Os valores apresentados referem-se a média dos dois maiores valores de resistência, obtidos de quatro corpos de prova.







Tabela 4-3. Resultado dos ensaios de resistência à compressão dos concretos produzidos com granito 1, com diferentes dimensões máximas características, relações água/materiais cimentantes, nas idades de 3, 7 e 28 dias

Granito 2									
Idade 3 dias	Dimensão máxima 12,7 mm			Dimensão máxima 19,0 mm			Dimensão máxima 25,0 mm		
	Relação água/materiais cimentantes			Relação água/materiais cimentantes			Relação água/materiais cimentantes		
	0,28	0,33	0,40	0,28	0,33	0,40	0,28	0,33	0,40
Corpo de prova 1	69,52	58,70	41,38	64,17	57,04	45,45	67,86	59,08	48,06
Corpo de prova 2	69,26	56,53	41,00	66,34	54,75	45,71	69,52	57,68	47,62
Média	69,39	57,61	41,19	65,25	55,90	45,58	68,69	58,38	47,84
Desvio padrão	0,18	1,53	0,27	1,53	1,62	0,18	1,17	0,99	0,32
Idade 7 dias	Dimensão máxima 12,7 mm			Dimensão máxima 19,0 mm			Dimensão máxima 25,0 mm		
	Relação água/materiais cimentantes			Relação água/materiais cimentantes			Relação água/materiais cimentantes		
	0,28	0,33	0,40	0,28	0,33	0,40	0,28	0,33	0,40
Corpo de prova 1	79,70	70,79	52,23	79,70	73,08	58,70	73,98	70,54	57,04
Corpo de prova 2	79,20	70,41	52,97	77,99	68,88	59,84	73,08	69,90	54,88
Média	79,45	70,60	52,65	78,85	70,98	59,27	73,53	70,22	55,96
Desvio padrão	0,36	0,27	0,45	1,22	2,97	0,81	0,63	0,45	1,53
Idade 28 dias	Dimensão máxima 12,7 mm			Dimensão máxima 19,0 mm			Dimensão máxima 25,0 mm		
	Relação água/materiais cimentantes			Relação água/materiais cimentantes			Relação água/materiais cimentantes		
	0,28	0,33	0,40	0,28	0,33	0,40	0,28	0,33	0,40
Corpo de prova 1	100,59	86,71	70,66	91,04	89,76	77,54	99,19	92,95	73,47
Corpo de prova 2	98,68	87,09	70,66	96,00	90,72	77,03	99,31	90,53	75,12
Média	99,63	86,90	70,66	93,52	90,24	77,29	99,25	91,74	74,29
Desvio padrão	1,35	0,27	0,00	3,51	0,68	0,36	0,09	1,71	1,17



Tabela 4-4. Resultado dos ensaios de resistência à compressão dos concretos produzidos com granito 1, com diferentes dimensões máximas características, relações água/materiais cimentantes, nas idades de 3, 7 e 28 dias

Granito 3									
	Dimensão máxima 12,7 mm			Dimensão máxima 19,0 mm			Dimensão máxima 25,0 mm		
	Relação água/materiais cimentantes			Relação água/materiais cimentantes			Relação água/materiais cimentantes		
	0,28	0,33	0,40	0,28	0,33	0,40	0,28	0,33	0,40
Idade 3 dias	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)
Corpo de prova 1	65,06	59,08	43,93	60,48	54,11	45,58	62,01	53,22	43,04
Corpo de prova 2	65,06	57,42	42,91	61,37	53,73	45,33	61,50	49,34	40,93
Média	65,06	58,25	43,42	60,92	53,92	45,45	61,75	51,28	41,99
Desvio padrão	0,00	1,17	0,72	0,63	0,27	0,18	0,36	2,75	1,49
	Dimensão máxima 12,7 mm			Dimensão máxima 19,0 mm			Dimensão máxima 25,0 mm		
	0,28			0,28			0,28		
	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)
Idade 7 dias	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)
Corpo de prova 1	75,12	67,10	55,51	71,94	69,84	60,86	77,67	64,94	54,24
Corpo de prova 2	73,34	66,72	54,62	73,47	68,88	58,31	71,94	65,95	51,82
Média	74,23	66,91	55,07	72,70	69,36	59,59	74,80	65,45	53,03
Desvio padrão	1,26	0,27	0,63	1,08	0,39	1,80	4,05	0,72	1,71
	Dimensão máxima 12,7 mm			Dimensão máxima 19,0 mm			Dimensão máxima 25,0 mm		
	0,28			0,28			0,28		
	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)
Idade 28 dias	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)
Corpo de prova 1	92,31	86,96	76,90	86,07	80,47	72,58	83,52	77,16	68,12
Corpo de prova 2	93,20	87,35	76,01	89,89	78,94	72,45	83,27	80,47	69,26
Média	92,76	87,15	76,46	87,98	79,71	72,51	83,40	78,81	68,69
Desvio padrão	0,63	0,27	0,63	2,70	1,08	0,09	0,18	2,34	0,81

Nota: Os valores apresentados na tabela referem-se aos dois maiores valores de resistência, obtidos a partir de quatro corpos de prova.



Tabela 4-5. Resultado dos ensaios de resistência à compressão dos concretos produzidos com granito 1, com diferentes dimensões máximas características, relações água/materiais cimentantes, nas idades de 3, 7 e 28 dias

Diabásio									
Idade 3 dias	Dimensão máxima 12,7 mm			Dimensão máxima 19,0 mm			Dimensão máxima 25,0 mm		
	Relação água/materiais cimentantes			Relação água/materiais cimentantes			Relação água/materiais cimentantes		
	0,28	0,33	0,40	0,28	0,33	0,40	0,28	0,33	0,40
Corpo de prova 1	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)
Corpo de prova 2	63,34	52,97	42,78	59,08	48,51	46,60	56,28	50,29	39,98
Média	62,01	52,97	41,76	58,44	52,33	45,84	54,62	49,91	38,71
Desvio padrão	62,68	52,97	42,27	58,76	50,42	46,22	55,45	50,10	39,34
	0,95	0,00	0,72	0,45	2,70	0,54	1,17	0,27	0,90
Idade 7 dias	Dimensão máxima 12,7 mm			Dimensão máxima 19,0 mm			Dimensão máxima 25,0 mm		
	Relação água/materiais cimentantes			Relação água/materiais cimentantes			Relação água/materiais cimentantes		
	0,28	0,33	0,40	0,28	0,33	0,40	0,28	0,33	0,40
Corpo de prova 1	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)
Corpo de prova 2	70,54	64,30	56,02	67,99	59,46	56,66	65,45	56,28	48,57
Média	69,90	64,94	56,02	67,74	59,46	56,66	64,94	58,70	48,38
Desvio padrão	70,22	64,62	56,02	67,86	59,46	56,66	65,20	57,49	48,48
	0,45	0,45	0,00	0,18	0,00	0,00	0,36	1,71	0,14
Idade 28 dias	Dimensão máxima 12,7 mm			Dimensão máxima 19,0 mm			Dimensão máxima 25,0 mm		
	Relação água/materiais cimentantes			Relação água/materiais cimentantes			Relação água/materiais cimentantes		
	0,28	0,33	0,40	0,28	0,33	0,40	0,28	0,33	0,40
Corpo de prova 1	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)	Res. (MPa)
Corpo de prova 2	89,76	79,58	68,75	78,18	72,07	70,66	71,94	72,83	65,95
Média	86,58	79,58	68,88	78,05	74,23	67,48	73,08	67,74	66,65
Desvio padrão	88,17	79,58	68,82	78,11	73,15	69,07	72,51	70,28	66,30
	2,25	0,00	0,09	0,09	1,53	2,25	0,81	3,60	0,50

Nota: Os valores apresentados na tabela referem-se aos dois maiores valores de resistência, obtidos a partir de quatro corpos de prova.



Tabela 4-6. Resultado dos ensaios de resistência à compressão dos concretos produzidos com o mesmo tipo de agregado mas com diferentes coeficientes de forma aos 28 dias de idade

DIABÁSIO									
Tipo de agregado		“Lamelar”				“Cubica”			
Forma do agregado		0.28		0.33		0.40		0.28	
a/(c+sa)		Res. (MPa)		Res. (MPa)		Res. (MPa)		Res. (MPa)	
Corpo de prova 1		78,30		68,75		49,91		83,65	
Corpo de prova 2		76,39		70,16		49,27		84,03	
Média		77,35		69,46		49,59		83,84	
Desvio Padrão		1,35		0,99		0,45		0,27	
GRANITO 3									
Tipo de agregado		“Lamelar”				“Cubica”			
Forma do agregado		0.28		0.33		0.40		0.28	
		Res. (MPa)		Res. (MPa)		Res. (MPa)		Res. (MPa)	
Corpo de prova 1		85,94		73,34		60,22		93,84	
Corpo de prova 2		86,45		74,36		58,57		91,42	
Média		86,20		73,85		59,40		92,63	
Desvio Padrão		0,36		0,72		1,17		1,71	
								0,63	
								75,76	
								76,65	
								76,20	
								0,63	
								2,34	

Nota: Os valores apresentados na tabela referem-se aos dois maiores valores de resistência, obtidos de quatro corpos de prova.

## 4.2 Discussão dos resultados

### 4.2.1 Introdução

A análise dos resultados é condição indispensável à compreensão da influência das variáveis investigadas no comportamento à compressão dos concretos de alta resistência. Ela também revela não só a acuidade com que foram realizados os ensaios como também exterioriza, de forma indireta, a uniformidade dos materiais empregados.

No capítulo 3, citou-se que o número de corpos de prova empregado para a análise das variáveis seria igual a quatro e que apenas os dois maiores resultados seriam considerados. Esta análise segue os mesmos procedimentos.

### 4.3 Análise da evolução da resistência à compressão

A taxa de crescimento da resistência do concreto com o tempo é, basicamente, função do tipo de cimento, da relação água/materiais cimentantes, da presença ou não de adições minerais ou aditivos. Contudo, nos concretos de alta resistência, tanto a mineralogia quanto a dimensão máxima característica e forma dos agregados graúdos podem alterar a resistência do concreto e assim sendo, podem alterar o comportamento da evolução da resistência.

A evolução de resistência à compressão dos concretos é considerada tanto pelo Código Modelo do CEB (1990) quanto pelo Comitê 209 do ACI (1986). As expressões recomendadas por esses Códigos para estimar a resistência à compressão em uma determinada idade, levam em consideração o tipo de cimento empregado e as equações possuem coeficientes que variam em função dessa escolha.

A equação do Código Modelo do CEB (1990) é a seguinte:

$f_{cm(t)} = \exp(s[1 - (28/t)^{0,5}])f_{cm28}$ , sendo  $s = 0,20$  para cimentos de alta resistência inicial;  $0,25$  para cimentos de comuns e  $0,38$  para cimentos de endurecimento lento.



Já a expressão recomendada pelo ACI é a seguinte:

$f_{cm}(t) = (t / (a + bt)) f_{c28}$ , com  $a$  e  $b$  constantes para cada tipo de cimento empregado, sendo  $a=4,0$ , para o cimento ASTM Tipo I e  $2,3$  para o cimento ASTM Tipo III;  $b= 0,85$  para ASTM I e  $0,92$  para o ASTM Tipo III.

Em se tratando da evolução de resistência de concretos produzidos com diferentes cimentos, pode-se recorrer ao recente trabalho de dissertação apresentado por FERRARI (1995), no qual ela verifica a evolução da resistência nos CAR com cimentos CP II-E-40, CPIII-32 e CPV. ARI PLUS, além do trabalho apresentado por AGNESINI (1996), o qual trabalha com os cimentos CPII-E-32 e dois tipos CPV.

Desejando verificar a influência de cura, quando da presença ou não de adições altamente pozolânicas, pode-se recorrer à tese de DALMOLIN (1995), que retrata a influência tanto da cura quanto da presença de sílica ativa na evolução da resistência nos CAR. Há também o trabalho de ROUGERON E AÏTCIN (1994), no qual os autores produziram concretos com e sem sílica ativa. Além desses, há trabalho realizado por AZEVEDO et al (1993), que produziram concretos com relação água/materiais cimentantes igual a  $0,35$  com teores de  $6\%$ ,  $8\%$ ,  $10\%$  e  $12\%$  de sílica ativa e revelam a expressiva mudança na taxa de crescimento de resistência apresentada pelos concretos com  $12\%$  de sílica ativa, em torno de  $20\%$  a mais, na idade de  $1$  e  $3$  dias, em comparação com o concreto produzido com  $6\%$  de sílica ativa, de  $16\%$  a mais na idade de  $7$  dias, e  $14\%$  a mais na idade de  $90$  dias. SADVIK e GJORV (1996) propuseram a seguinte equação:  $f_{c28} = \alpha f_{cin} + \beta$ , onde  $\alpha$  e  $\beta$  são constantes que dependem do teor de sílica ativa e  $f_{cin}$  é a resistência à compressão na idade  $n$ .

As equações propostas para evolução de resistência necessitam considerar a influência da relação água/materiais cimentantes, o tipo de rocha do agregado e a dimensão máxima característica.

No presente trabalho são constantes o tipo de cimento utilizado (CPI- S-32), as condições de cura (imersos em água saturada de cal na temperatura de  $23 \pm 1^\circ \text{C}$ ), os teores de sílica ativa ( $10\%$ ), o teor de plastificante ( $0,5\%$ ), e o de superplastificante

(3,0 %). As variáveis investigadas são: o tipo de rocha do agregado, a dimensão máxima característica e a relação água/materiais cimentantes.

Para verificar a taxa de crescimento do concreto ao longo do tempo foram realizados ensaios nas idades de 3, 7 e 28 dias, em concretos produzidos com quatro diferentes tipos de agregados, com três dimensões máximas características e com relações água/materiais cimentantes 0,40, 0,33 e 0,28. Com o auxílio da tabela 4-7 é possível verificar que a taxa de crescimento de resistência dos concretos está intimamente relacionada com a relação água/materiais cimentantes e com a idade de ensaio, além do tipo de agregado e dimensão máxima característica. Nota-se, outrossim, que, com a redução da relação água/materiais cimentantes, ocorre uma aceleração no grau de hidratação dos cimentos nas primeiras idades que se manifesta através de crescente ganho de resistência, principalmente nas idades de três e sete dias. Estas informações são bastante úteis, principalmente para indústria de pré-moldados, uma vez que elas auxiliam na tomada de decisão quanto à desmoldagem e ao transporte. Não obstante, altas resistências iniciais são também desejáveis em estruturas de concreto armado que, exigem desformas prematuras e significativas cargas nos primeiros dias subsequentes à concretagem. Além disso, altas resistências iniciais são também desejáveis em reparos de pontes, rodovias, edificações e barragens.

Tabela 4-7 Percentagem de resistências alcançadas aos 3 e 7 dias em relação aos 28 dias de idade, nas diferentes relações água/materiais cimentantes

	Percentagem de resistência alcançada aos 3 dias					
<b>a/(c+sa)</b>	Granito 1	Granito 2	Granito 3	Diabásio	Média	Desvio
0.28	67.98 %	69.65 %	70.42 %	71.08 %	69.78 %	1.34 %
0.33	60.48 %	68.57 %	66.84 %	66.56 %	65.61 %	3.54 %
0.40	55.93 %	58.29 %	56.79 %	61.42 %	58.11 %	2.41 %
	Percentagem de resistência alcançada aos 7 dias					
<b>a/(c+sa)</b>	Granito 1	Granito 2	Granito 3	Diabásio	Média	Desvio
0.28	79.89 %	80.19 %	80.03 %	79.64 %	79.94 %	0.23 %
0.33	75.05 %	81.25 %	76.77 %	81.20 %	78.57 %	3.15 %
0.40	77.18 %	74.50 %	72.02 %	81.41 %	76.28 %	4.02 %



Através da análise dos resultados é possível constatar que para a relação água/materiais cimentantes igual a 0,28 não houve variação expressiva na percentagem dos ganhos de resistência nas idades de três e sete dias de idade, independente do tipo de agregado empregado. Já para as relações água/materiais cimentantes superiores as percentagens de ganhos de resistência parecem serem afetadas pelo tipo de agregado empregado.

O gráfico da figura 4-1 retrata o comportamento da evolução da resistência, ao longo do tempo, para os diferentes tipos de agregados, na relação água/materiais cimentantes igual a 0,28, e para os agregados produzidos com agregados de dimensão máxima característica de 12,7 mm.

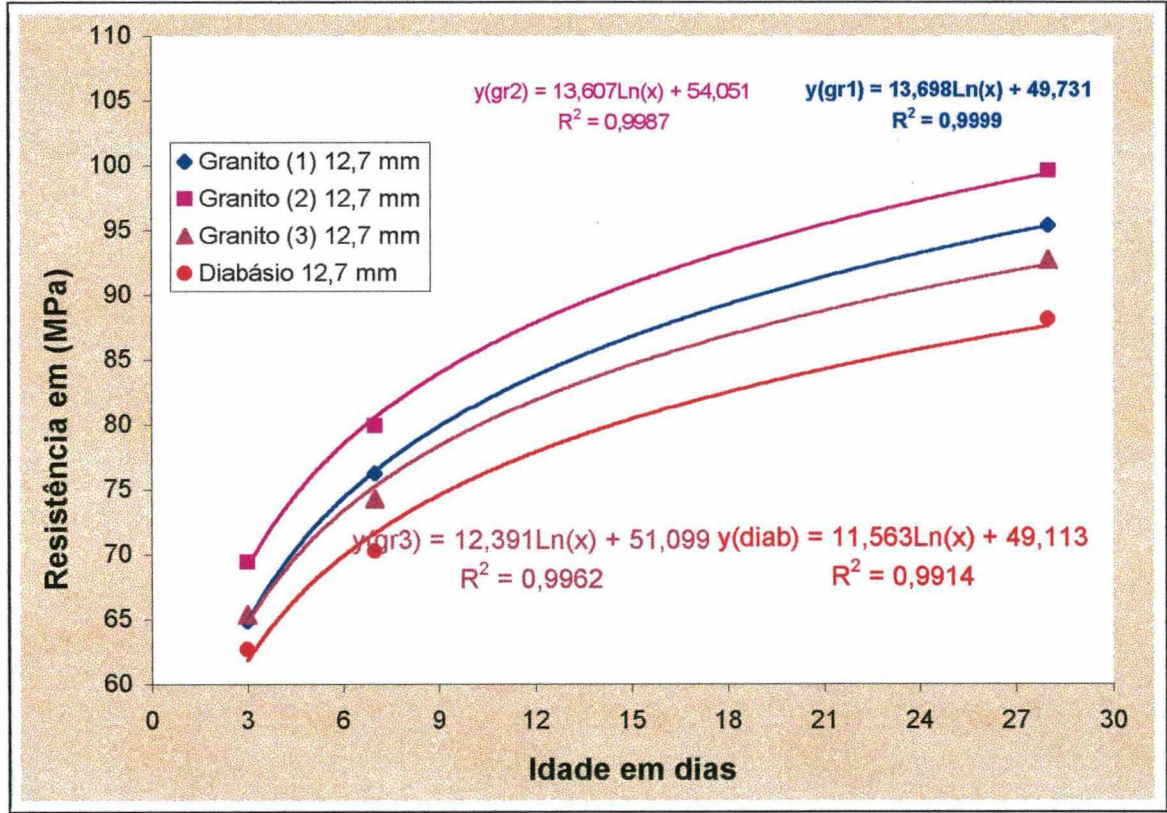


Figura 4-1 Influência do tipo de agregado na evolução da resistência; concretos com agregados de D.M.C=12,7 mm e  $a/(c+sa)=0,28$

O gráfico da figura 4-2 retrata o comportamento da evolução da resistência, ao longo do tempo, para os diferentes tipos de agregados, na relação água/materiais cimentantes igual a 0,28, e para os agregados produzidos com agregados de dimensão máxima característica de 25.0 mm.

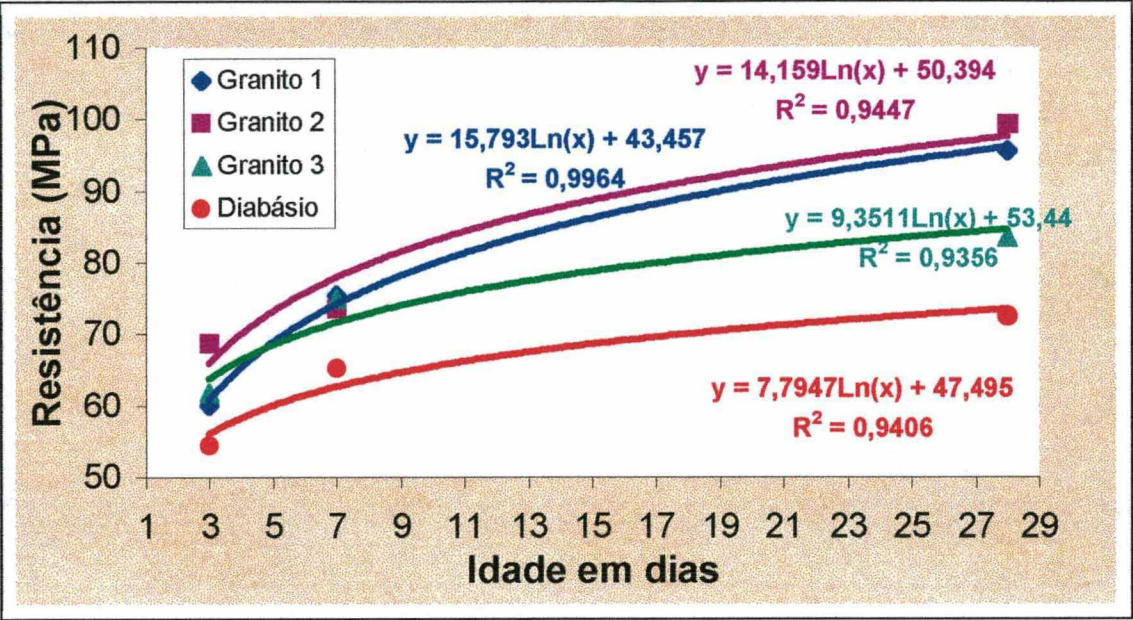


Figura 4-2 Influência do tipo de agregado na evolução de resistência; concretos produzidos com relação  $a/(c+sa) = 0,28$  e agregados de D.M.C= 25.0 mm

A influência da relação água/materiais cimentantes na evolução da resistência pode ser percebida através da figura 4.3

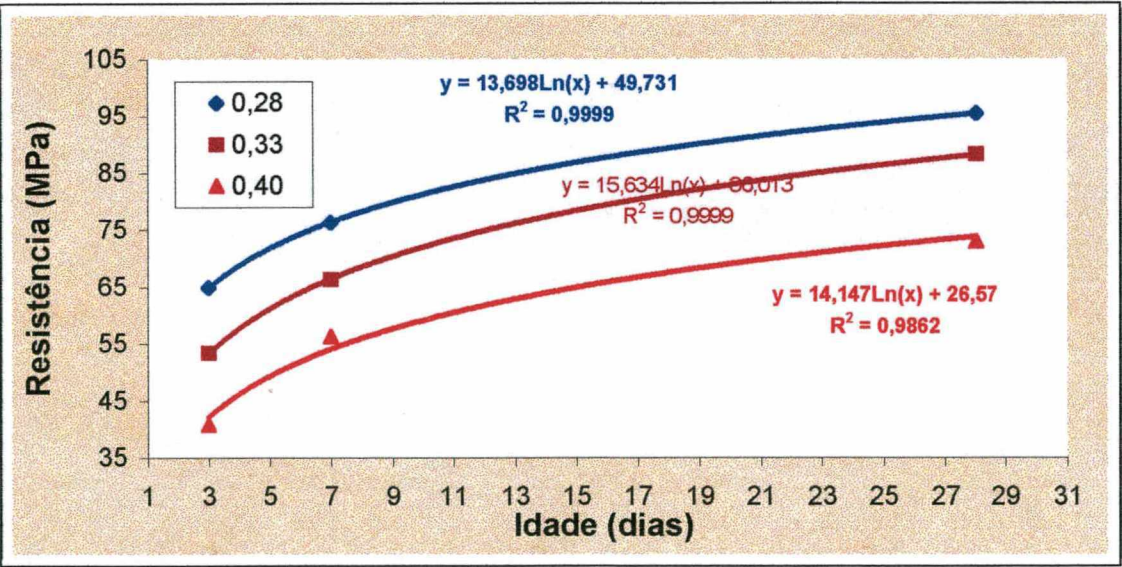


Figura 4-3-Influência da relação água/materiais cimentantes na evolução da resistência



Os elevados ganhos de resistência alcançados nas primeiras idades nos concretos produzidos com baixas relações água/materiais cimentantes podem estar associados à maior facilidade de nucleação propiciada pela sílica ativa e ao elevado teor de material cimentante (sílica ativa e cimento) que, ao reagirem em maior proporção, elevam a temperatura da massa de concreto, e propiciam o surgimento de novas reações.

Com o auxílio do gráfico da figura 4.3 é possível constatar que a evolução de resistência à compressão dos CAR, com o tempo, possui comportamento bastante ajustável a uma função logarítmica se adaptando bem na representação do comportamento mecânico do concreto, principalmente para os agregados investigados, dimensões máximas características adotadas, e relações água/materiais cimentantes empregadas. Sua escolha é apropriada e justifica-se pelo elevado ganho de resistência nas idades de 3 e 7 dias, além das graduais diminuições de ganho de resistência ao longo do tempo.

O conhecimento dessas funções é pertinente, ainda que sejam específicas para o tipo de cimento adotado, teor de sílica ativa, tipo de agregado, e dimensão máxima característica, pois através dela pode-se obter uma estimativa de resistência à compressão nas diferentes idades.

Através dos gráficos das figuras 4.1 e 4.2 pôde-se constatar a influência do tipo de agregado na evolução da resistência.

Os gráficos das figuras 4.4 e 4.5 mostram a influência da dimensão máxima característica na evolução da resistência.

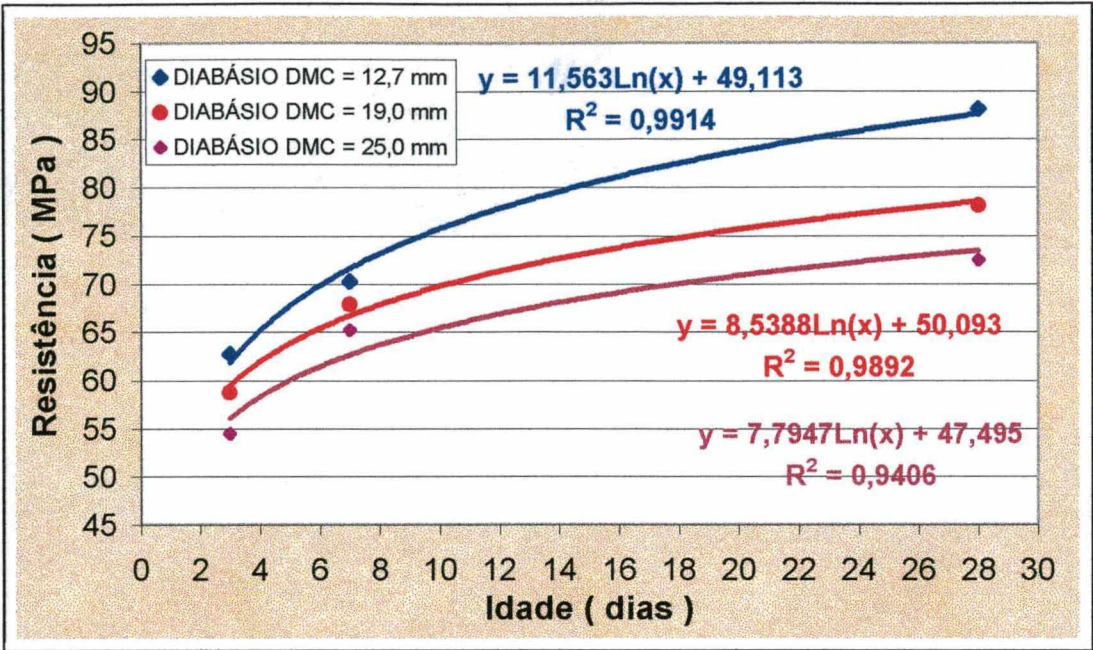


Gráfico 4-4 Influência da dimensão máxima característica na evolução da resistência de concretos produzidos com relação  $a/(c+sa)=0,28$  e agregados de diabásio

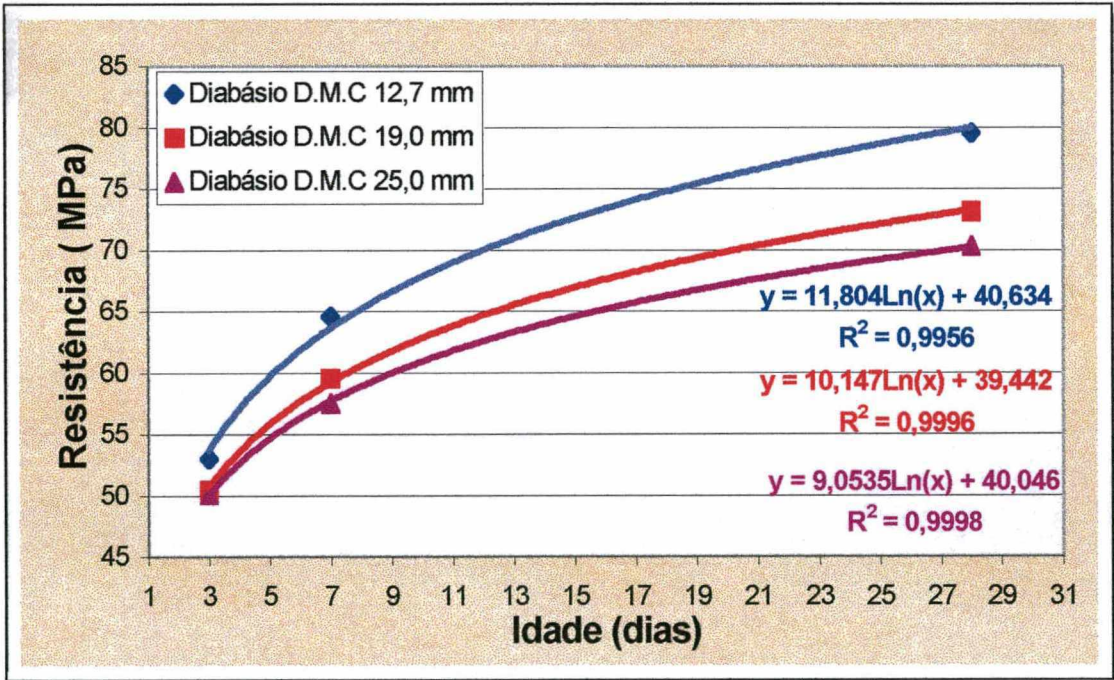


Gráfico 4-5 Influência da dimensão máxima característica na evolução da resistência de concretos produzidos com relação  $a/(c+sa)=0,33$  e agregados de diabásio

Através dos gráficos das figuras 4.1 e 4.2, constata-se que a mineralogia do agregado gráudo influencia na taxa de crescimento da resistência. Além disso, pôde-se constatar



através dos gráficos das figuras 4.4, e 4.5, que a evolução de resistência à compressão é também afetada pela dimensão máxima característica do agregado graúdo. Não obstante, o gráfico da figura 4.3 revela a influência da relação água/materiais cimentantes na taxa de crescimento de resistência, principalmente nas primeiras idades.

#### **4.4 A influência da dimensão máxima característica dos agregados graúdos na resistência à compressão**

Inicialmente, faz-se necessário enfatizar que a dimensão máxima característica e máxima dimensão do agregado são conceitos completamente distintos. Enquanto a dimensão máxima característica refere-se à dimensão, em mm, da peneira de malha quadrada, na qual a porcentagem de material retirado acumulado é igual ou imediatamente inferior a 5 %, a máxima dimensão do agregado trata da maior das três dimensões.

Os agregados graúdos com menor dimensão máxima característica são potencialmente menos fissurados e esta característica dificulta a ruptura prematura. Além disso, tais alterações granulométricas, provocam significativas mudanças na estrutura interna do concreto. Os espaços entre os agregados são reduzidos, as fissuras, ao redor dos grãos, originam-se em estágios mais avançados de carregamento e devido à proximidade entre as fissuras, há maior probabilidade de que as mesmas se interliguem e aumente-se o percurso médio das fissuras. Contudo, essas vantagens podem não serem suficientemente fortes para, a princípio, excluírem a utilização dos agregados graúdos com dimensão máxima característica de 19,0 ou 25,0 mm.

A escolha por uma ou outra dimensão máxima característica gera modificações não só na estrutura interna do concreto como também acarreta mudança nos níveis de tensão na zona de transição. Assim, com o intuito de reduzir essas tensões internas, pode-se empregar agregados graúdos com menor dimensão máxima característica, os quais são portadores de maiores áreas específicas e/ou, utilizar agregados graúdos com módulos de elasticidade próximos ao da matriz.

Para a transmissão de um determinado grau de carregamento quanto maiores forem as áreas, menores serão as tensões. Contudo, esse benefício pode gerar dois diferentes

efeitos colaterais: I) alterações na relação água/materiais cimentantes – caso a mistura solicitar mais água de molhagem, para um mesmo traço – com alterações nos níveis de resistência; II) uma redução na quantidade de agregados incorporados – quando se mantém constante a relação água/materiais cimentantes – com implicações diretas no consumo de materiais cimentantes.

As tabelas 4-8, 4-9, 4-10 e 4-11 e as figuras 4.9 e 4.10 materializam o comportamento dos concretos à compressão com os diferentes agregados nas diferentes D.M.C.

Tabela 4-8 Influência da dimensão máxima característica dos agregados graúdos e nas diferentes relações água/materiais cimentantes na resistência à compressão, aos idade 28 dias.

Granito 1			
	Dimensão Máxima Característica		
a/(c+sa)	12,7 mm	19,0 mm	25,0 mm
	Resistência (MPa)	Resistência (MPa)	Resistência (MPa)
0,28	95,43	92,37	95,62
0,33	88,20	87,76	82,06
0,40	72,89	72,07	70,54

Tabela 4-9 Resultado das resistências médias à compressão de concretos produzidos com o granito 2, nas diferentes dimensões máximas características e nas diferentes relações água/materiais cimentantes, na idade de 28 dias.

Granito 2			
	Dimensão Máxima Característica		
a/(c+sa)	12,7 mm	19,0 mm	25,0 mm
	Resistência (MPa)	Resistência (MPa)	Resistência (MPa)
0,28	99,63	93,52	99,25
0,33	86,90	90,24	91,74
0,40	70,66	77,29	74,29



Os dados das tabelas 4.9 e 4.10 permitem evidenciar que tanto o granito 1 quanto o granito 2 se comportam de forma semelhante para a relação água/materiais cimentantes igual a 0,28, ou seja, ocorrem pequenas perdas de resistência quando se alteram as dimensões máximas características de 12,7 mm para 19,0 mm; contudo, quando se muda a dimensão máxima de 12,7 mm para 25,0 mm, os desempenhos são praticamente iguais. Os decréscimos de resistência à compressão, quando da utilização de agregados com dimensão máxima de 19,0 mm, podem ter ocorrido devido aos diferentes teores de argamassa, uma vez que os concretos com esses agregados demandaram 56 % de argamassa, enquanto que os concretos produzidos com agregados de dimensão máxima de 12,7 mm e 25,0 mm, demandaram teor de argamassa de 58 %. A qualidade da zona de transição ou da matriz dos concretos podem ter sido alteradas com a mudança do teor de argamassa. Já para relações de água/materiais cimentantes menores essa redução no teor de argamassa parece ser favorável à resistência.

Diante dos resultados é possível deduzir que, para os agregados provenientes tanto do granito 1 quanto do granito 2, praticamente não há inconveniente em se utilizar aqueles com dimensões máximas características de 19,0 e 25,0 mm, para a relação água/materiais cimentantes igual a 0,28, o que confirma as teorias de MEHTA e MONTEIRO (1994) e do ACI 363-R (1992) e a FIB/CEB (1990). Contudo, nota-se não haver igualdade de comportamento para as relações água/materiais cimentantes de 0,33 e 0,40, quando das mudanças de dimensões máximas características. A causa provável da perda de resistência do granito 1 quando do aumento da dimensão máxima característica de 12,7 mm para 19,0 e 25,0 mm, pode estar vinculada à forma do granito 1, uma vez que este possuía menor coeficiente de forma que o granito 2. As mudanças de dimensões máximas características dos agregados de granito 1, que possuíam formato mais alongado, podem ter propiciado um aumento na segregação interna, modificando a qualidade da zona de transição, ou terem reduzido a seção transversal do agregado e gerando perdas na resistência final do concreto. A redução da resistência devido ao aumento da dimensão máxima característica também foi observado por AGNESINI (1996). Contudo, para os concretos produzidos com granito 2, aumentos na dimensões máximas características do agregado gráudo não resultaram em perdas na resistência; ao contrário, as resistências foram ampliadas com essas mudanças.

Dando continuidade a análise da influência da dimensão máxima característica no desempenho à compressão nos CAR, verificaremos o desempenho dos agregados de granito 3 e diabásio, quando da mudança da dimensão máxima característica.

Tabela 4-10 Resistência média dos concretos produzidos com granito 3, com diferentes dimensões máximas características e diferentes relações água/materiais cimentantes, na idade de 28 dias

Granito 3						
a/(c+sa)	Dimensão Máxima Característica					
	12,7 mm		19,0 mm		25,0 mm	
	Resistência (MPa)		Resistência (MPa)		Resistência (MPa)	
0,28	92,76	100 %	87,98	94,85 %	83,40	89,9 %
0,33	87,15	100 %	79,71	91,46 %	78,81	90,43 %
0,40	76,46	100 %	72,51	94,83 %	68,69	89,83 %

Analisando os resultados da tabela 4-10 pode-se perceber que a perda de resistência do concreto com o aumento da dimensão máxima característica ocorreu em todas as relações água/materiais cimentantes estudadas. Para as misturas elaboradas com os agregados de D.M.C igual a 19,0 mm essa queda foi em torno de 6 %, em relação às de 12,7 mm e, de 10 % para as misturas elaboradas com agregados de D.M.C igual a 25,0 mm. Essas quedas de resistência não parecem terem sido afetadas pelas mudanças nas relações água/materiais cimentantes.

O gráfico da figura 4.6 mostra as resistências médias à compressão de concretos produzidos com agregados de granito 3, com diferentes dimensões máximas características e diferentes relações água/materiais cimentantes.



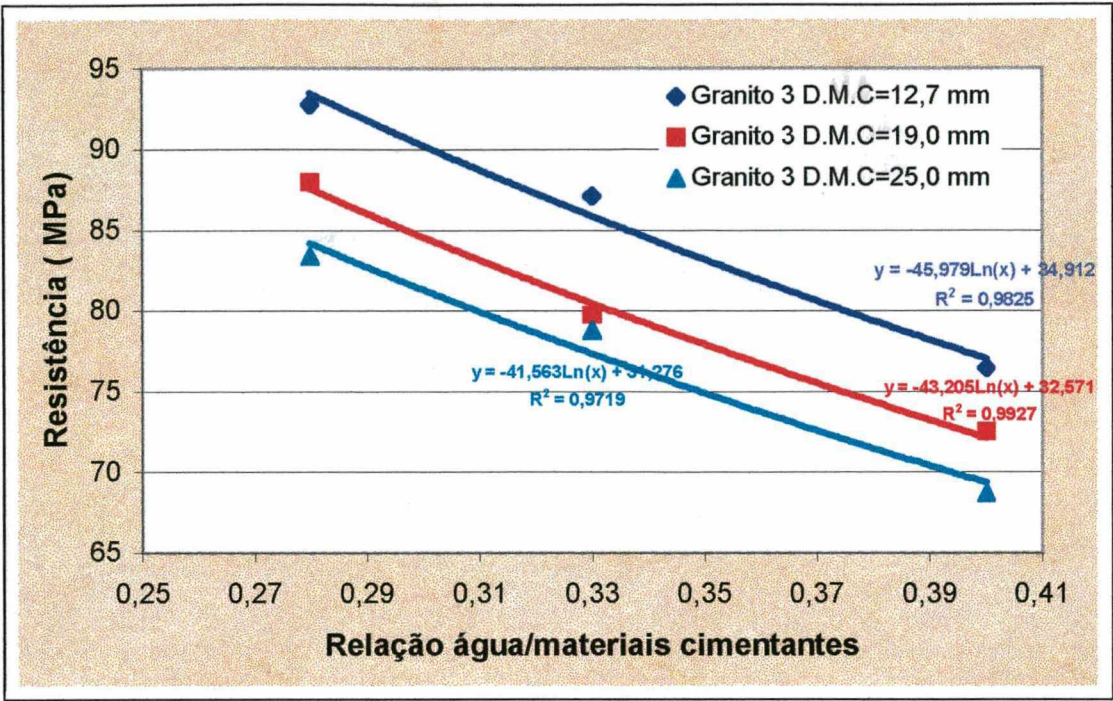


Figura 4.6 Influência da dimensão máxima característica na resistência à compressão dos concretos produzidos com granito 3, nas diferentes relações água/materiais cimentantes, na idade de 28 dias

A tabela 4.11 e a figura 4.10 mostra a influência da dimensão máxima característica na resistência média dos concretos produzidos com agregados de rocha de diabásio, nas diferentes relações água/materiais cimentantes, na idade de 28 dias.

Tabela 4-11 Resistência média dos concretos produzidos com diabásio, com diferentes dimensões máximas características e diferentes relações água/materiais cimentantes, na idade de 28 dias

Diabásio						
a/(c+sa)	Dimensão Máxima Característica					
	12,7 mm		19,0 mm		25,0 mm	
	Resistência (MPa)		Resistência (MPa)		Resistência (MPa)	
0,28	88.17	100 %	78.11	88.6 %	72.51	82.23 %
0,33	79.58	100 %	73.15	91.92 %	70.28	88.31 %
0,40	68.82	100 %	69.07	100.36 %	66.30	96.34



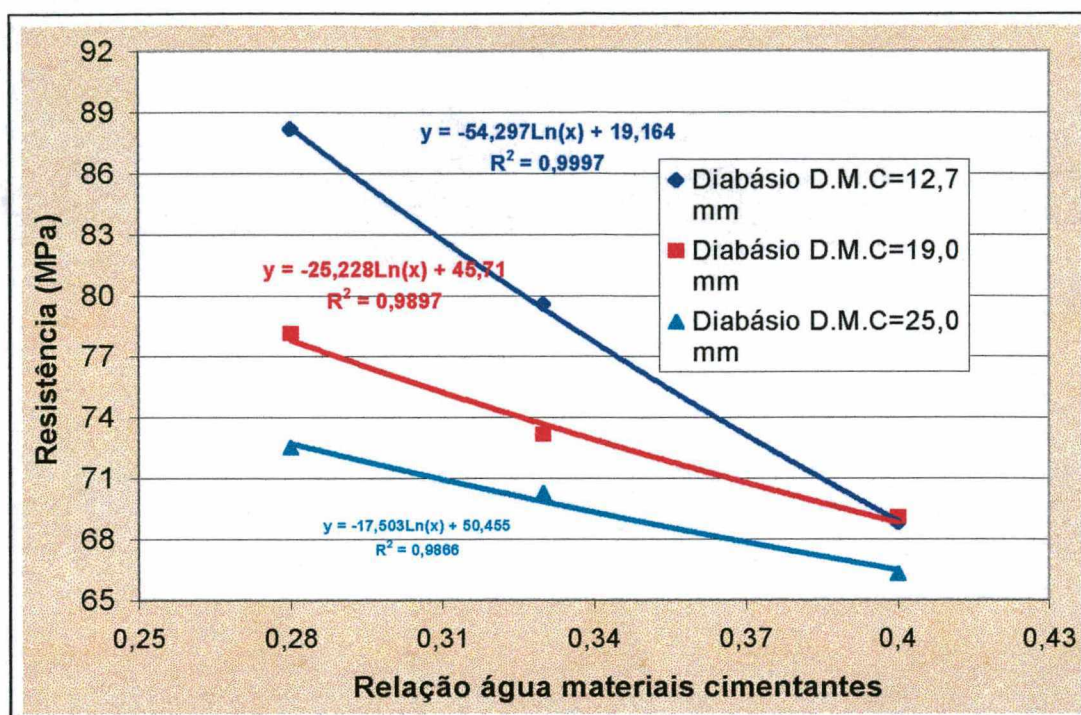


Figura 4.7 Resistência média à compressão de concretos produzidos com agregados de diferentes dimensões máximas características, com diabásio, nas diferentes relações água/materiais cimentantes, na idade de 28 dias

Ainda que a tabela 4-11 e o gráfico da figura 4.10 possam ser ferramentas valiosas tanto na interpretação quanto na didática, é praticamente imperiosa a realização de análises minuciosas que permitam caracterizar o comportamento de cada variável investigada.

Inicialmente, é importante salientar que tanto o granito 3 quanto o diabásio possuíam características físicas bastante semelhantes, ou seja, ambos eram portadores de baixos coeficientes de forma, textura lisa e grãos com a menor dimensão bastantes reduzida. Com esses agregados notou-se que os efeitos do aumento da dimensão máxima característica foram bastante expressivos e resultaram em significativas quedas de resistência.

Os concretos produzidos com diabásio, nas diferentes relações água/materiais cimentantes, apresentaram quedas de resistência bastante variáveis. Na menor relação água/materiais cimentantes (0,28), a queda foi mais intensa – 11,4 % e 7,17 %. Já para a relação 0,33, as quedas foram de 8,08 % e 3,93 % e, finalmente, para a relação 0,40, as perdas foram de 0,0 % e 3,6 %.

Com os dados supra citados, é possível constatar que as quedas de resistência foram mais pronunciadas na passagem de 12,7 mm para 19,0 mm.

As causas mais prováveis para esse comportamento podem estar vinculadas aos seguintes fatores: a) maior grau de microfissuração dos agregados com maior dimensão máxima que face ao aumento das tensões – menor quantidade de grãos com conseqüente redução de áreas – rompem prematuramente; b) os grãos possuindo formas mais alongadas propiciam a formação de zonas de transição mais alongadas, as quais facilitam a formação de uma maior exsudação interna que fragilizou a zona de transição.

AGNESINI (1996), trabalhando com CAR, usando basalto britado, também constatou perdas de resistência quando aumentou a dimensão máxima característica do agregado graúdo de 9,5 mm para 19,0 mm. MEHTA (1994), constatou queda de resistência à compressão pelo aumento da dimensão máxima característica. Não é demais enfatizar que quando da mudança das dimensões máximas características mantiveram-se constantes as relações água/materiais cimentantes.

#### **4.5 Influência da dimensão máxima característica dos agregados graúdos no consumo de materiais cimentantes e na resistência à compressão**

É de extrema importância lembrar que a mudança da dimensão máxima característica do agregado graúdo é capaz de produzir modificações na quantidade de material incorporado à mistura e, conseqüentemente, alterações no consumo de material cimentante.

Os agregados com maior dimensão máxima característica, face à redução da área específica, poderão necessitar de menor quantidade de água de mistura, permitindo uma redução na relação água/materiais cimentantes, quando mantido o traço, ou conduzir a uma redução no consumo de material cimentante, pela inclusão de maior quantidade de agregados, quando mantida a relação água/materiais cimentantes. Portanto, é salutar que, quando da análise da influência da dimensão máxima do agregado, faça-se, simultaneamente, um estudo de relação custo/benefício.



Diante dessas considerações preliminares, um dos procedimentos aconselháveis é o da análise do desempenho. Para tanto basta criar um gráfico que relacione a resistência à compressão e o consumo de material cimentante, para cada uma das dimensões máximas características estudadas. Tendo-se o gráfico em mãos, basta estabelecer a resistência com a qual se deseja trabalhar e traçar uma reta paralela ao eixo “x”, para encontrar qual das D.M.C propiciará o melhor consumo de material cimentante – critério válido quando não há restrições quanto a D.M.C e quando se analisa um mesmo tipo de agregado graúdo. Quando houver restrições quanto a D.M.C e se dispor de vários tipos de agregados graúdos, o procedimento acima descrito ainda é válido, entretanto, o gráfico será formado por diferentes tipos de agregados graúdos.

Para verificar a influência da dimensão máxima característica dos agregados graúdos na resistência à compressão e no consumo de cimento é necessário enfocar um tipo de agregado por vez, muito embora haja a possibilidade de agrupar agregados com o mesmo tipo de comportamento.

A figura 4.8 mostra a influência da dimensão máxima característica do agregado graúdo da rocha de granito 1 no consumo de cimento e na resistência à compressão dos CAR.

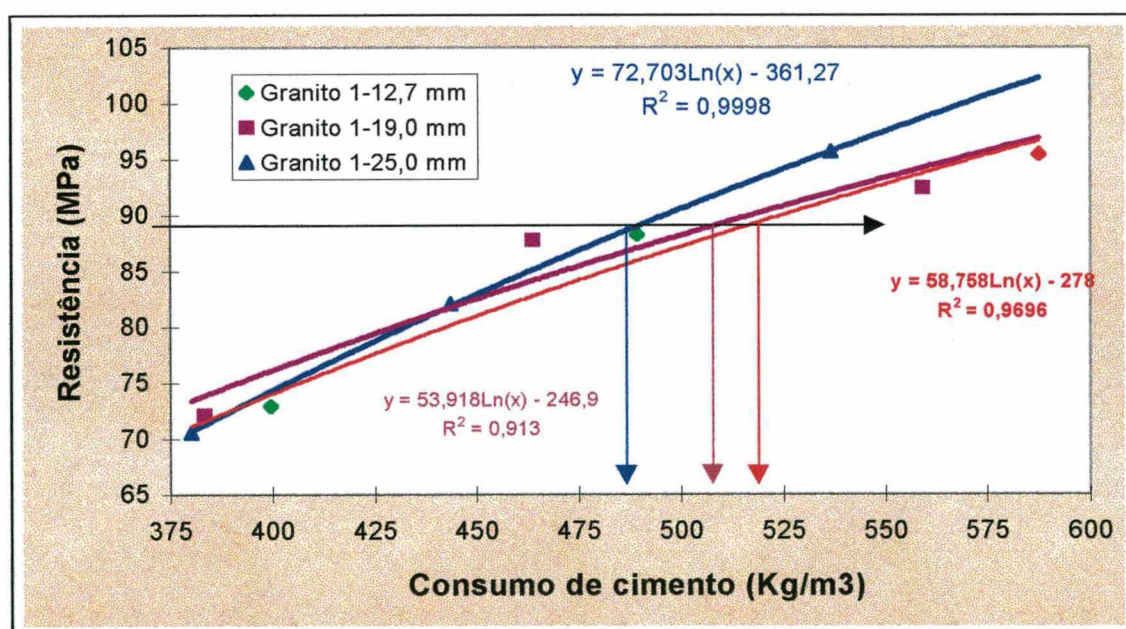


Figura 4.8 Influência da dimensão máxima característica do agregado graúdo da rocha do granito 1 no consumo de cimento e na resistência à compressão dos CAR

Para esse tipo de agregado (granito 1) é possível constatar, através dos gráficos da figura 4.8 que os concretos produzidos com agregados graúdos de D.M.C = 25,0 mm alcançaram, para consumos superiores a 470 Kg de cimento, maiores níveis de resistência. A figura 4.8 revela, outrossim, desempenhos equivalentes para concretos produzidos com agregados de dimensão máxima característica de 12,7 e 19,0 mm. Semelhantes ganhos de resistência foram apontados por ALMEIDA (1994) e PEREIRA NETO (1995), com a ressalva de que os referidos autores trabalharam com consumos de materiais cimentantes de 500 Kg/m<sup>3</sup>.

O gráfico da figura 4.9 mostra a influência da dimensão máxima característica do agregado graúdo da rocha de granito 2 no consumo de cimento e na resistência à compressão dos CAR.

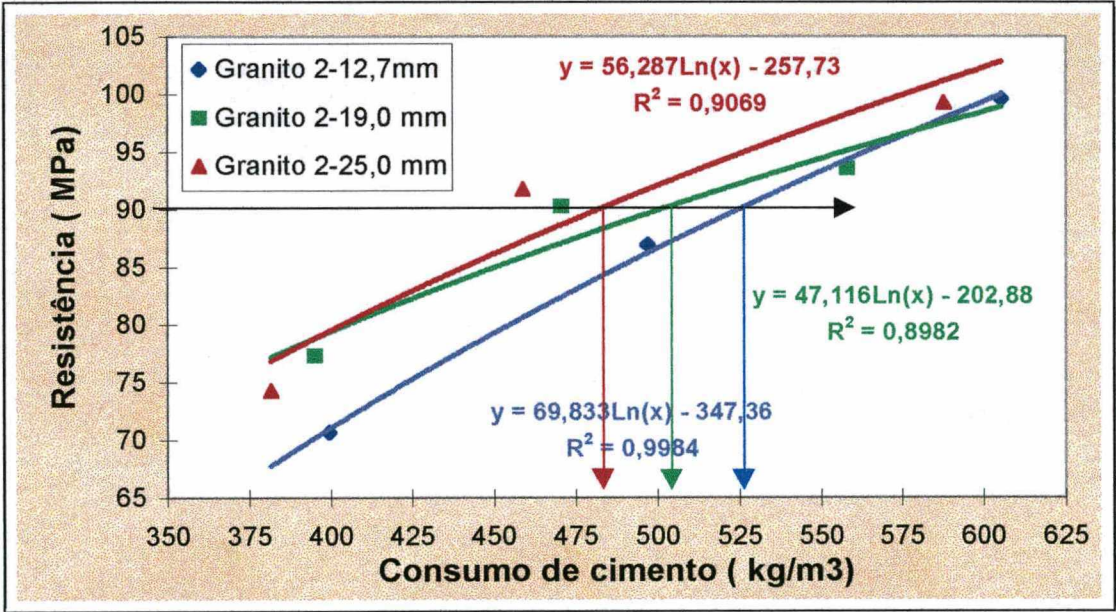


Figura 4.9 Influência da dimensão máxima característica do agregado graúdo da rocha de granito 2 no consumo de cimento e na resistência à compressão dos CAR.

Com o auxílio do gráfico da figura 4.9 é possível verificar que, para consumos inferiores a 600 Kg/m<sup>3</sup>, pode-se obter significativos ganhos de resistência ao se evitar a utilização de agregados com dimensão máxima de 12,7 e 19,0 mm.

O gráfico de figura 4.10 mostra a influência da dimensão máxima característica do agregado graúdo no consumo de cimento e na resistência à compressão dos CAR, produzidos com agregados da rocha de granito 3.



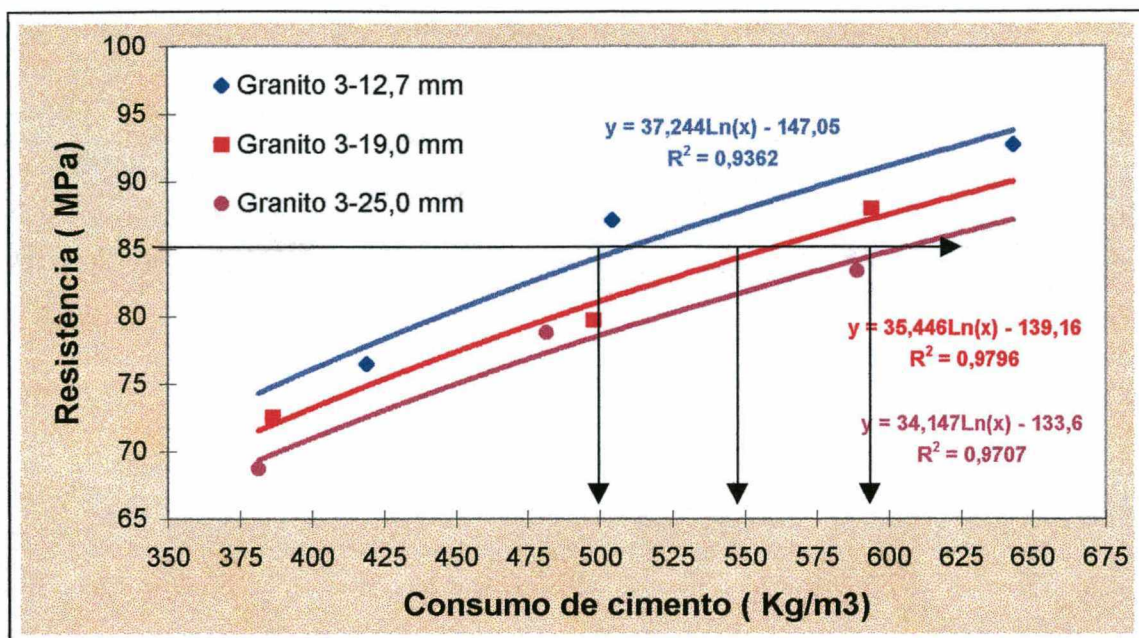


Figura 4.10 Influência da dimensão máxima característica do agregado graúdo da rocha de granito 3 no consumo e na resistência à compressão dos CAR.

O gráfico da figura 4.10 permite-nos visualizar qual é o comportamento do consumo de material cimentante quando da alteração da dimensão máxima característica do agregado de granito 3. Nota-se que na medida em que se emprega agregados de maior dimensão máxima característica o consumo de material cimentante se eleva e com essa elevação tem-se aumento de custo, aumento do calor de hidratação e possivelmente da retração, de modo que seria aconselhável, para esse tipo de agregado o emprego de uma dimensão máxima superior a 12,7 mm. Observa-se, outrossim, que quando se mantém o mesmo consumo de material cimentante ocorre uma significativa perda de resistência quando se modifica a dimensão máxima característica de 12.7 mm para 19.0 mm e para 25.0 mm.

O gráfico da figura 4.11 mostra a influência da dimensão máxima característica do agregado graúdo da rocha de diabásio no consumo de material cimentante e na resistência a compressão dos concretos de alta resistência.

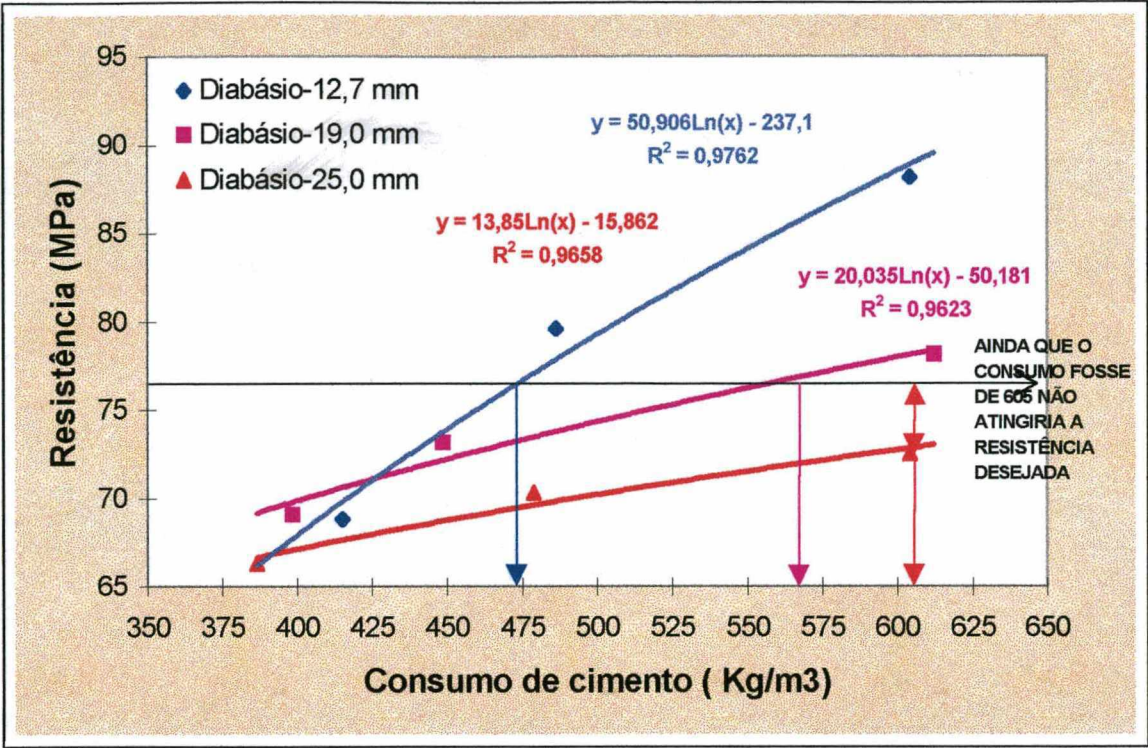


Figura 4.11 Influência da dimensão máxima característica do agregado graúdo da rocha de diabásio no consumo e na resistência à compressão dos CAR.

Esse gráfico revela com que intensidade a dimensão máxima característica influencia o desempenho à compressão dos concretos produzidos com agregados de diabásio, tornando-se, nesse caso, quase que imperiosa a utilização de agregados de dimensão máxima característica de 12.7 mm. O ganho técnico e econômico praticamente descartam a possibilidade de utilização de agregados de diabásio com dimensão máxima igual ou superior a 19,0 mm.

Analizando os resultados, é possível verificar que os concretos produzidos com os agregados graúdos investigados não apresentam comportamento semelhante frente às alterações de dimensões máximas características.

Os concretos produzidos com granito 1 não apresentaram perdas significativas de resistência, quando do aumento da dimensão máxima característica mas, a resistência dos concretos produzidos com granito 3 e diabásio foram significativamente reduzidas com o aumento da dimensão máxima característica. Já os concretos produzidos com os agregados de granito 2 expressaram substanciais ganhos de resistência com o aumento



da dimensão máxima característica. Este fato pode estar vinculado ao melhor formato dos grãos dos agregados de granito 2. Além disso, não se pode descartar a possibilidade de os agregados de granito 2 apresentarem uma estrutura interna menos microfissurada.

Os concretos produzidos com granitos 1 e 2 incorporaram maior quantidade de material à mistura, quando produzidos com agregados graúdos de dimensões máxima característica de 19,0 e 25,0 mm; além disso, essas mudanças não produziram perdas na resistência à compressão. Assim, tais agregados mostraram uma favorável tendência ao aumento da dimensão máxima característica. Comportamento totalmente adverso foi observado no granito 3 e no diabásio quando da mudança das dimensões máximas características, pois o ganho obtido – incorporação de maior quantidade de material na mistura – gerou perdas de grande magnitude, as quais revelaram-se não compensatórias.

#### **4.6 Influência da mineralogia dos agregados graúdos na resistência à compressão e no consumo de material cimentante dos concretos de alta resistência**

A mineralogia do agregado graúdo afeta o comportamento do concreto à compressão de forma diferenciada. A influência se faz sentir com maior clareza quando a zona de transição e a matriz do concreto são mais resistentes que o agregado. Contudo, quando a pasta e o agregado possuem resistências muito próximas, as diferentes absorções, formas e texturas do agregado produzem diferentes interações com a pasta, o que modifica, consideravelmente, a zona de transição. Quando essa zona de transição se torna a limitadora da resistência final, fica difícil prever o quanto a mineralogia afeta o desempenho à compressão. Portanto, parece ser salutar que esta análise seja feita considerando as diferentes relações  $a/(c+sa)$ , e as diferentes dimensões máximas características.

As interações que ocorrem entre os agregados e a matriz geram modificações reológicas no concreto e, para que esses apresentem a mesma trabalhabilidade, faz-se necessário a inclusão ou a retirada dos agregados e assim o consumo de material

cimentante é modificado em cada uma das diferentes misturas. A capacidade que cada tipo de mistura de concreto possui para incorporar uma maior ou uma menor quantidade de material está, basicamente, vinculada à absorção, à forma e à textura dos agregados, de modo que o consumo de material cimentante é dependente desta capacidade de incorporação.

O gráfico da figura 4.12 mostra a influência da mineralogia do agregado graúdo na resistência à compressão dos concretos produzidos com agregados de D.M.C= 12,7 mm.

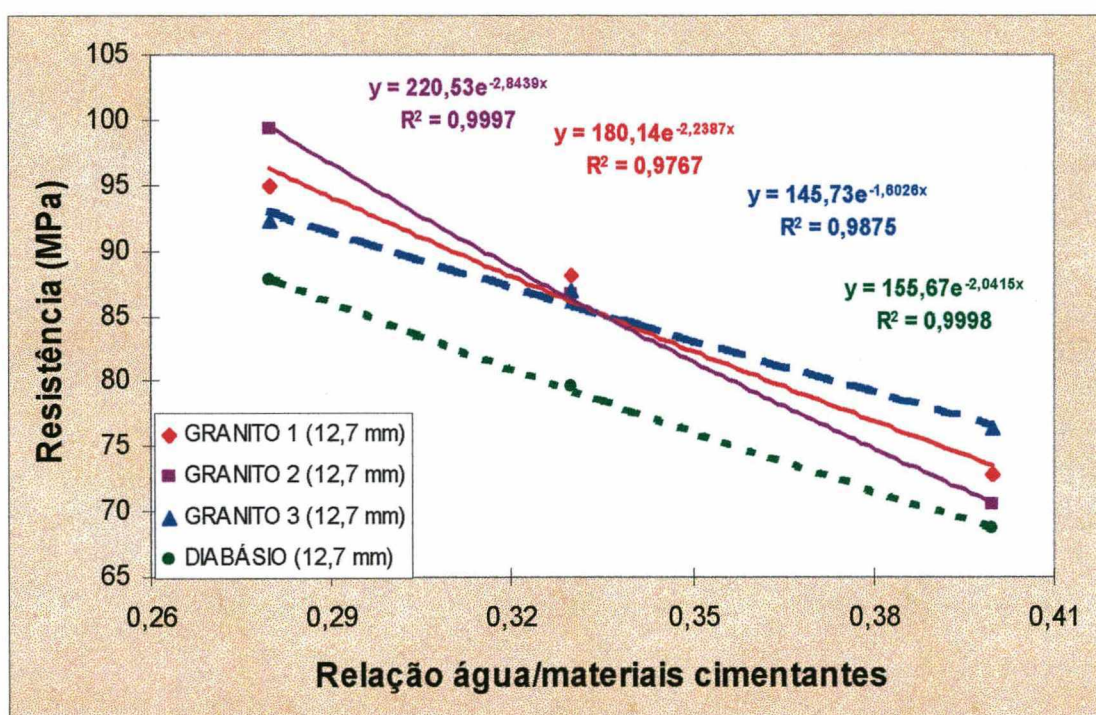


Figura 4.12 Influência do tipo de agregado graúdo na resistência à compressão dos CAR, concretos produzidos com agregados de D.M.C.=12.7 mm, na idade de 28 dias.

Através do gráfico da figura 4.12 é possível perceber nitidamente que o concreto produzido com agregado de diabásio apresenta para todas as relações  $a/(c+sa)$  o pior desempenho. Contudo, no intervalo de 0,35 à 0,32 é bastante difícil perceber diferenças significativas entre os agregados, talvez esteja nesse intervalo o limite da resistência da zona de transição, mas a medida em que os concretos são produzidos com menores relações  $a/(c+sa)$ , nota-se que o concreto produzido com granito 2 atinge os maiores níveis de resistência. A influência mineralógica dos agregados graúdos, com dimensão máxima característica de 12,7 mm, começa a manifestar-se a partir das relações água/materiais cimentantes inferiores à 0,33, onde para essa granulometria a zona de



transição parecer deixar de ser limitante da resistência. Para relações inferiores a 0,33 os concretos produzidos com agregados de granito tipo 2 apresentam os melhores desempenhos, seguidos dos concretos produzidos com o granito 1, granito 3 e diabásio.

Para verificar como se comportam os concretos produzidos com diferentes agregados graúdos em relação ao consumo de material cimentante apresenta-se o gráfico da figura 4.13.

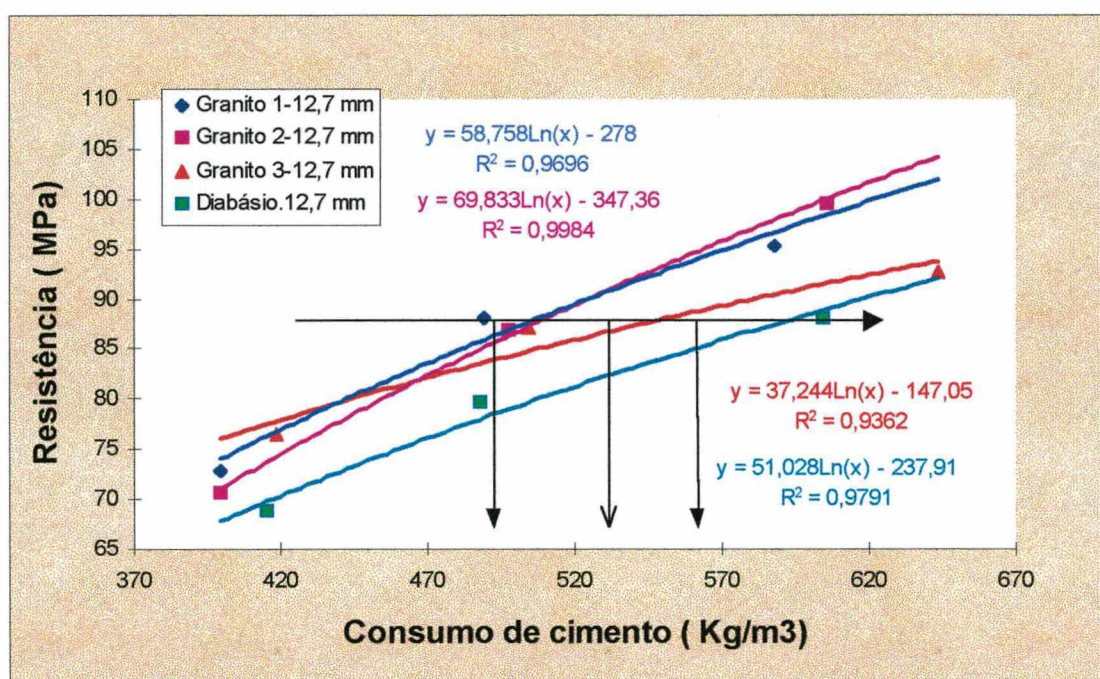


Figura 4.13 Influência do tipo de agregado graúdo no consumo de material cimentante, concretos produzidos com agregados de dimensão máxima característica de 12.7 mm.

Através do gráfico da figura 4.13, constata-se uma significativa proximidade no desempenho apresentado pelos concretos produzidos com granito 1 e granito 2, ao mesmo tempo em que esses expressam considerável superioridade técnica em relação aos concretos produzidos com granito 3 e diabásio.

Com o intuito de realçar a diferença no consumo de material cimentante, resolveu-se verificar qual seria o consumo para cada um dos concretos produzidos com os diferentes agregados, para os níveis de resistência em torno de 85 MPa e foi possível constatar as seguintes diferenças:

- Aproximadamente 40 kg entre os concretos produzidos com agregados de granito 1 e 2 e os concretos produzidos com granito 3;

- Cerca de 60 kg entre os concretos produzidos com agregados de granito 3 e os concretos produzidos com diabásio;
- Quase 100 kg de diferença entre os concretos produzidos com granito 1 e 2 e os concretos produzidos com os agregados de diabásio.

Desejando saber como se comportam os concretos produzidos com diferentes agregados graúdos, com agregados de dimensão máxima característica de 19,0 mm, no que se refere a resistência e ao consumo de material cimentante apresentam-se os gráficos da figuras 4.14 e 4.15.

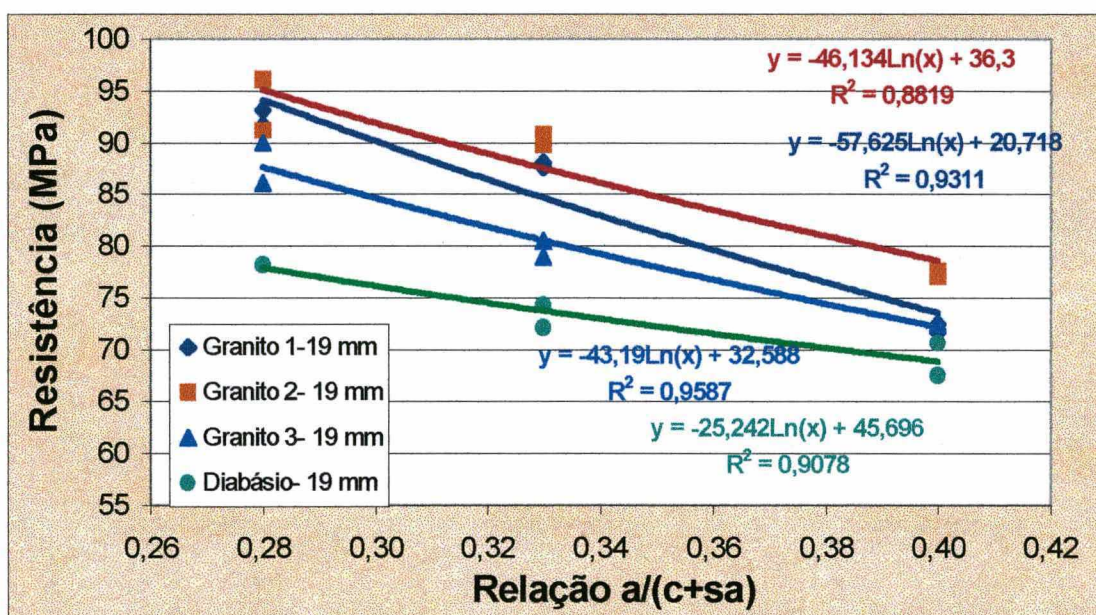
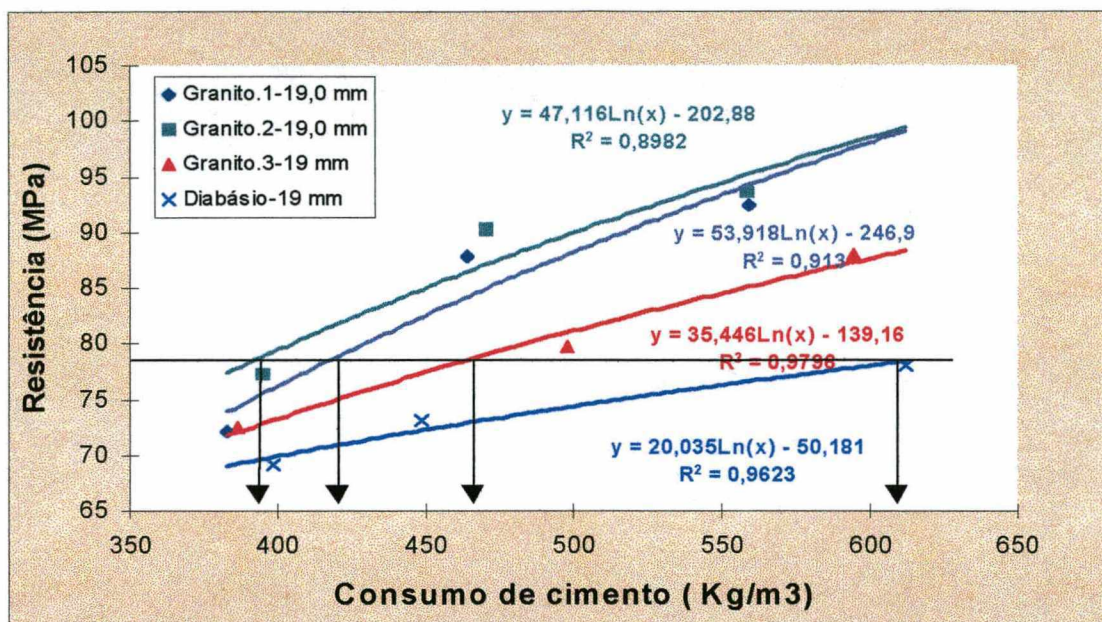


Figura 4.14 Influência do tipo de agregado graúdo na resistência à compressão dos CAR, produzidos com agregados de dimensão máxima característica de 19,0 mm

O gráfico da figura 4.14 permite-nos verificar o quanto o desempenho dos CAR, é afetado pelo mineralogia dos agregados graúdos. Essa diferença é função da relação água/materiais cimentantes e cresce a medida em que esta diminui. Os concretos produzidos com diabásio atingiram em média apenas 82 % da resistência dos produzidos com granito 1 e 2, para as relação  $a/(c+sa)=0,28$  e  $0,33$ . Para a relação  $a/(c+sa)=0,40$  essa percentual subiu, em média, para 93 %. No entanto, para os concretos produzidos com relação  $a/(c+sa)=0,40$ , com agregados graníticos (1, 2 e 3), não possível perceber mudanças significativas de desempenho técnico.



O gráfico da figura 4.15 mostra o quanto ao tipo de agregado graúdo é capaz de interferir no consumo de material cimentante.



A figura 4.15 mostra o gráfico do comportamento da resistência e do consumo de material cimentante dos concretos produzidos com diferentes agregados graúdos com D.M.C= 19,0 mm.

O gráfico da figura 4.15 revela com que intensidade o tipo de agregado graúdo de 19,0 mm é capaz de afetar no consumo de material cimentante. Essa diferença de material cimentante oscila em torno de 25 kg entre os concretos de granito 2 e granito 1 e próximo a 75 kg entre os concretos de granito 3 e os concretos de granito 2, e na ordem de 200 kg entre o concreto de granito 2 e os concretos produzidos com diabásio, valores esses obtidos quando se adota níveis de resistência próximo à 80 MPa.

A seguir, trata-se de verificar como se comportam os concretos produzidos com diferentes agregados graúdos, com dimensão máxima característica de 25,0 mm, quando analisados sob a luz do desempenho técnico e econômico.

O gráfico da figura 4.16 apresenta o desempenho técnico dos concretos produzidos com diferentes agregados graúdos de D.M.C= 25,0 mm, nas relações  $a/(c+sa) = 0,28, 0,33$  e  $0,40$ , na idade de 28 dias.

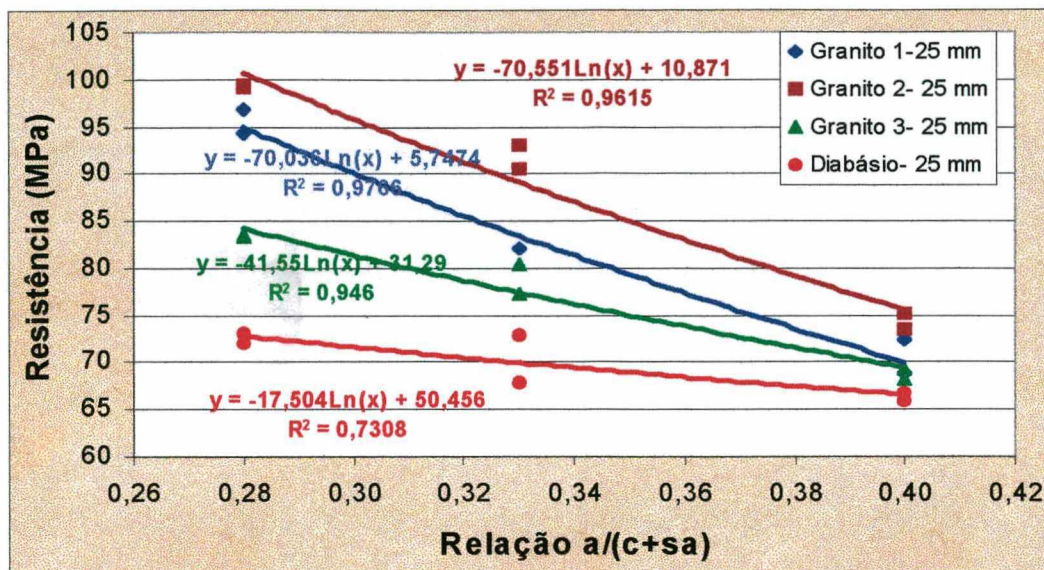


Figura 4.16 Influência da mineralogia dos agregados graúdos na resistência à compressão dos C.A.R , elaborados com agregados graúdos de D.M.C= 25,0 mm.

O gráfico da figura 4.16 materializa as significativas diferenças de desempenho técnico apresentadas pelos concretos produzidos com diferentes agregados de dimensão máxima característica de 25,0 mm, onde é possível identificar que os concretos produzidos com agregado de granito 2 apresentou o melhor desempenho, seguido do granito 1, granito 3 e diabásio. As diferenças de desempenho mostraram-se mais expressivas a medida em que as relações água/materiais cimentantes iam sendo reduzidas.

Os concretos produzidos com diabásio atingiram apenas 73 % da resistência dos concretos produzidos com granito 2 , ou visto de outra forma, pode-se dizer que os concretos de granito 2 tiveram um desempenho de 37 % superior, para a relação água/materiais cimentantes igual a 0,28. Para 0,33 essa superioridade é reduzida para 30 % e para 0,40 ela fica em torno de 12 %. Quando se compara o desempenho do concreto produzido com o granito 2 com o produzido com o granito 3, nota-se que esse ganho de desempenho é reduzido mas, ainda assim, bastante expressivo, na ordem dos 20 %. Entre os concretos de granito 2 e granito essas diferenças de desempenho são bem menores, em média 7 % .

A seguir, apresenta-se o gráfico da figura 4.17 que revela o comportamento do consumo



e da resistência dos concretos produzidos com diferentes agregados graúdos, com dimensão máxima característica igual a 25,0 mm, na idade de 28 dias.

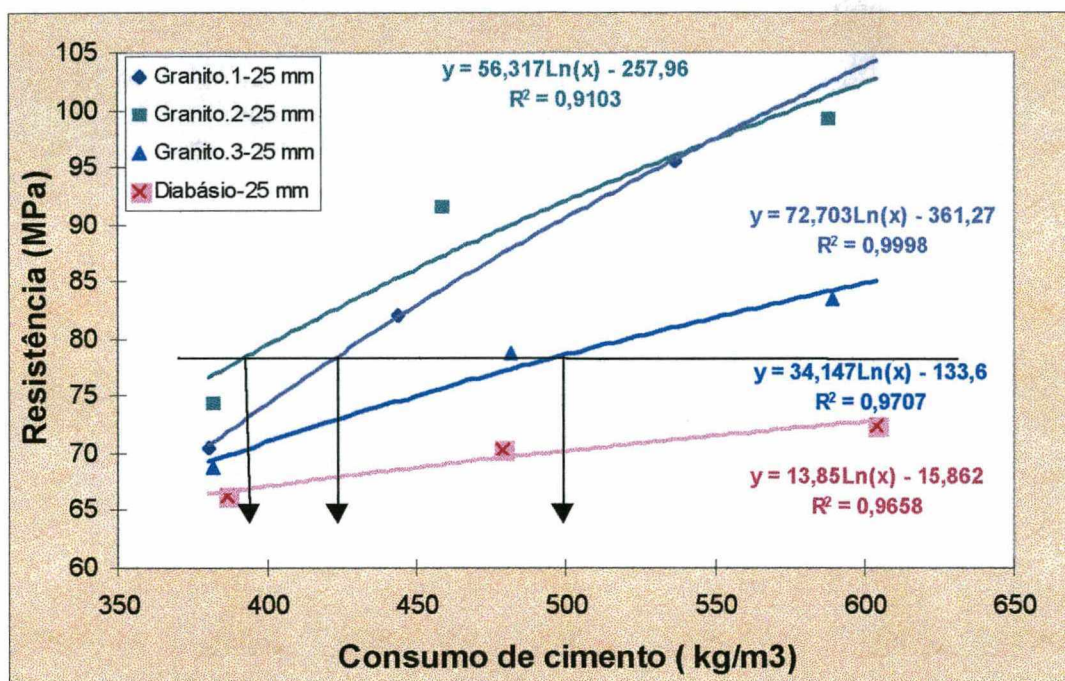


Figura 4.17 Influência do tipo de agregado graúdo no consumo de material cimentante, concretos produzidos com agregados graúdos de D.M.C=25,0 mm.

O gráfico da figura 4.17 contém informações bastante relevantes pois, expressa o comportamento dos concretos com o aumento do consumo de material cimentante, e revela as diferentes capacidades de ganho de resistência. Nesse gráfico é possível perceber que os concretos produzidos com agregados de diabásio apresentaram inexpressivos ganhos de resistência com o aumento no consumo de material cimentante. Esse comportamento foi observado por ALMEIDA 1990.

Além disso, é possível constatar que a resistência tanto os concretos produzidos com granito 1 quanto os produzidos com granito 2 cresce significativamente com o aumento do consumo.

Sobre outra ótica, é possível observar diferenças expressivas de consumo de material cimentante para níveis de resistência na ordem dos 80 MPa. Entre o concreto de granito 2 e o concreto de granito 3 a diferença de material cimentante oscila em torno de 110 kg. Além do mais, constata-se a incapacidade de os concretos produzidos com agregados de diabásio, de 25 mm, atingirem resistência igual ou superior a 80 MPa.

**4.7 Influência da forma do agregado graúdo no desempenho à compressão dos concretos de alta resistência**

Este estudo, face às limitações temporais, enfocou apenas os agregados que, em seu estado natural, possuíam forma não recomendável para a utilização em concreto de alta resistência. Esses agregados foram: granito 3 e diabásio e possuíam a granulometria de 12,7 e 19,0 mm. É salutar e prudente ressaltar a possibilidade de que os resultados tenham sido, parcialmente, afetados pelo efeito escala. A análise dos dados refere-se, unicamente, aos resultados dos ensaios aos 28 dias de idade.

A tabela 4-12 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias de idade.

Tabela 4-12 Influência da forma do agregado graúdo de diabásio, na resistência à compressão, (MPa)

a/(c+sa)	Diabásio lamelar fc <sub>28</sub> (MPa)	Diabásio Cúbica fc <sub>28</sub> (MPa)	Ganhos pela melhoria da forma
0,28	78,30	83,65	6,8 %
0,28	76,39	84,03	10,0 %
0,33	68,75	75,76	10,2 %
0,33	70,16	76,65	9,3 %
0,40	49,91	63,79	27,8 %
0,40	49,27	67,10	36,2 %

A tabela possibilita verificar as perdas e os possíveis ganhos que se pode obter através da adequada escolha da forma do agregado graúdo. É interessante verificar que o ganho obtido devido à utilização de um agregado com maior coeficiente foi diretamente proporcional ao inverso da relação água/cimento.

O gráfico da figura 4.18 auxilia na visualização do comportamento dos concretos frente às mudanças de forma.



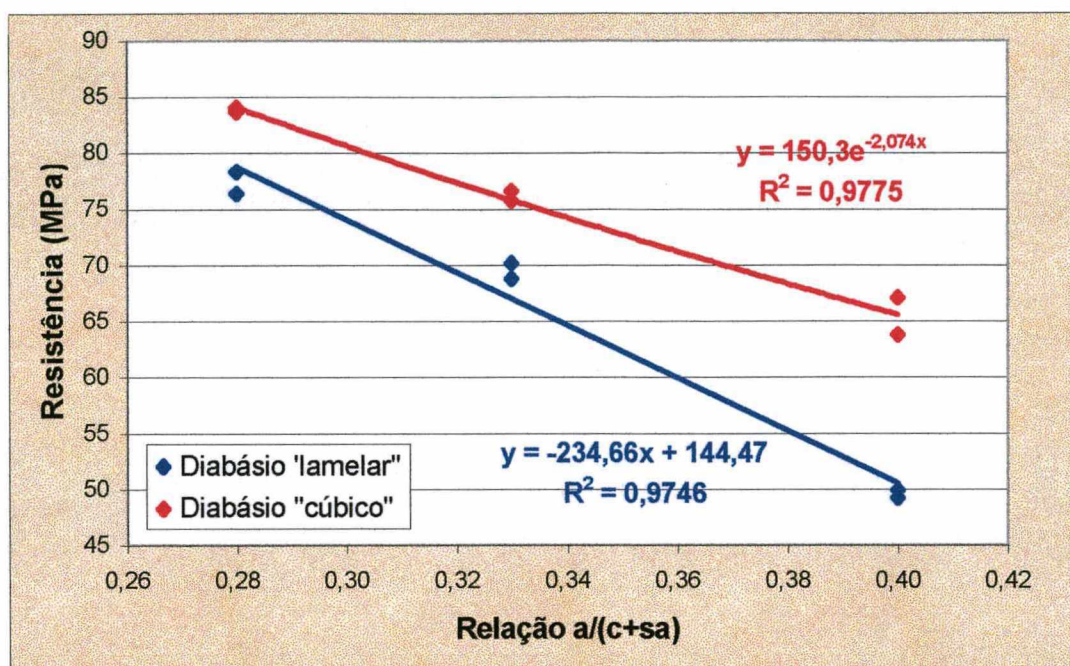


Figura 4.18 Influência da forma do agregado graúdo na resistência à compressão dos CAR; concretos produzidos com agregados de diabásio com D.M.C = 19,0 mm

O gráfico da figura 4.18 evidencia a influência da forma dos agregados graúdos no desempenho à compressão dos concretos de alta resistência produzidos com agregados de diabásio com dimensão máxima característica de 19,0 mm. Nota-se, que a influência da forma do agregado graúdo torna-se mais expressiva a medida em que se aumenta a relação  $a/(c+sa)$ , ou visto de outra forma, cresce a medida em que se diminui a quantidade de pasta. Essa redução na resistência, pode estar ligada ao aumento da exsudação interna e às elevadas tensões criadas devido a redução da superfície de contato matriz-agregado. Face as expressivas diferenças de desempenho, nota-se que os agregados de diabásio de forma próximas à cúbica são mais adequados aos concretos de alto desempenho.

A tabela 4-13 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão de concretos elaborados com diferentes formas, com agregado de granito 3, com D.M.C = 19,0 mm.

Tabela 4-13 Influência da forma do agregado graúdo de granito 3, na resistência à compressão, (MPa)

a/(c+sa)	Granito 3 lamelar fc <sub>28</sub> (MPa)	Granito 3 Cúbica fc <sub>28</sub> (MPa)	Ganhos pela melhoria de forma
0,28	85,94	93,84	9,19 %
0,28	86,45	91,42	5,74 %
0,33	73,34	86,58	18,06 %
0,33	74,36	89,13	19,86 %
0,40	60,22	72,07	19,66 %
0,40	58,57	73,34	25,22 %

A seguir, apresenta-se o gráfico da figura 4.19 o qual mostra a influência da forma do agregado de granito 3, de 19,0mm, na resistência à compressão dos C.A.R.

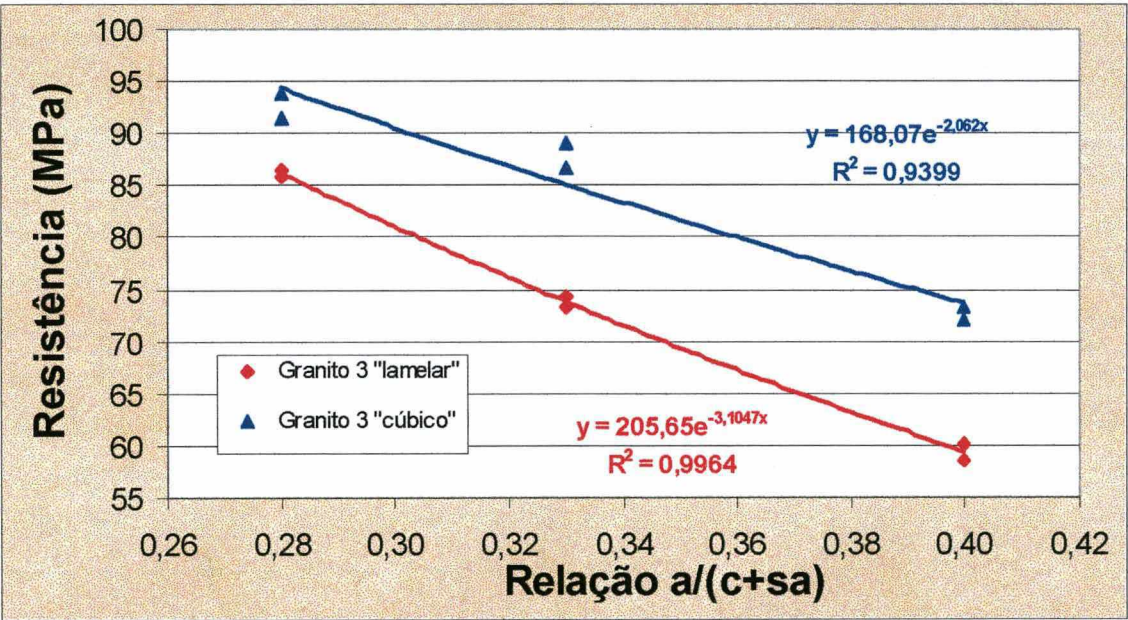


Figura 4.19 Influência da forma do agregado de granito 3 na resistência à compressão dos CAR, concretos produzidos com agregados de D.M.C=19,0 mm.

Os gráficos das figuras 4.18 e 4.19 revelam que a resistência à compressão é significativamente influenciada pela forma dos agregados. Os concretos produzidos com agregados que possuíam forma “cúbica” apresentaram em todas as relações a/(c+sa) valores de resistência bastante superiores aos concretos produzidos com agregados de forma “lamelar”. Assim, fica evidenciado a recomendação sugerida pela AFNOR P-18-301, que fixa para concretos estruturais e de baixa permeabilidade (barragens, reservatórios e obras marítimas ) um coeficiente volumétrico mínimo igual a 0,20.



É importante lembrar que as misturas foram produzidos com mesmo agregado, mesma relação água/cimento, mesma trabalhabilidade, mesma granulometria, mesmo teor de argamassa, e com diferentes coeficientes de forma.

#### **4.8 Análise do desempenho de concretos produzidos com diferentes agregados graúdos mas, coeficientes de forma muito próximos**

Nesta etapa do trabalho verifica-se qual é o efetivo desempenho dos CAR, produzidos com diferentes agregados graúdos com coeficientes de forma muito próximos.

A tabela 4-14 apresenta o resumo dos resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias, para as diferentes relações água/materiais cimentantes.

Tabela 4-14 Resultado dos ensaios de resistência à compressão de concretos produzidos com diferentes agregados graúdos mas com coeficientes volumétricos muito próximos

<b>a/(c+sa)</b>	<b>Granito 1 Fc (MPa)</b>	<b>Granito 2 Fc (MPa)</b>	<b>Granito 3 Fc (MPa)</b>	<b>Diabásio Fc (MPa)</b>
0,28	96,89	99,19	93,84	83,65
0,28	94,35	99,31	91,42	84,03
0,33	82,12	92,95	86,58	75,76
0,33	82,00	90,53	89,13	76,65
0,40	72,32	73,47	72,07	67,10
0,40	68,75	75,12	73,34	63,79

Analisando os resultados é possível constatar, para as relações água/materiais cimentantes 0,40 e 0,33, as semelhanças de desempenho entre os granitos 1 e 3, ao mesmo tempo em que se percebe a pequena diferença de resistência para a relação água/materiais cimentantes igual a 0,28. O significativo distanciamento existente entre as resistências atingidas com os granitos 1 e 3 são reduzidas. As diferenças que antes eram atribuídas à textura, à mineralogia e à forma do agregado passam a ser atribuídas apenas à textura e à mineralogia dos agregados.

O gráfico da figura 4.20, nos facilita a compreensão do comportamento dos concretos produzidos com agregados graúdos de mesma dimensão máxima característica e coeficientes de forma muito próximos.

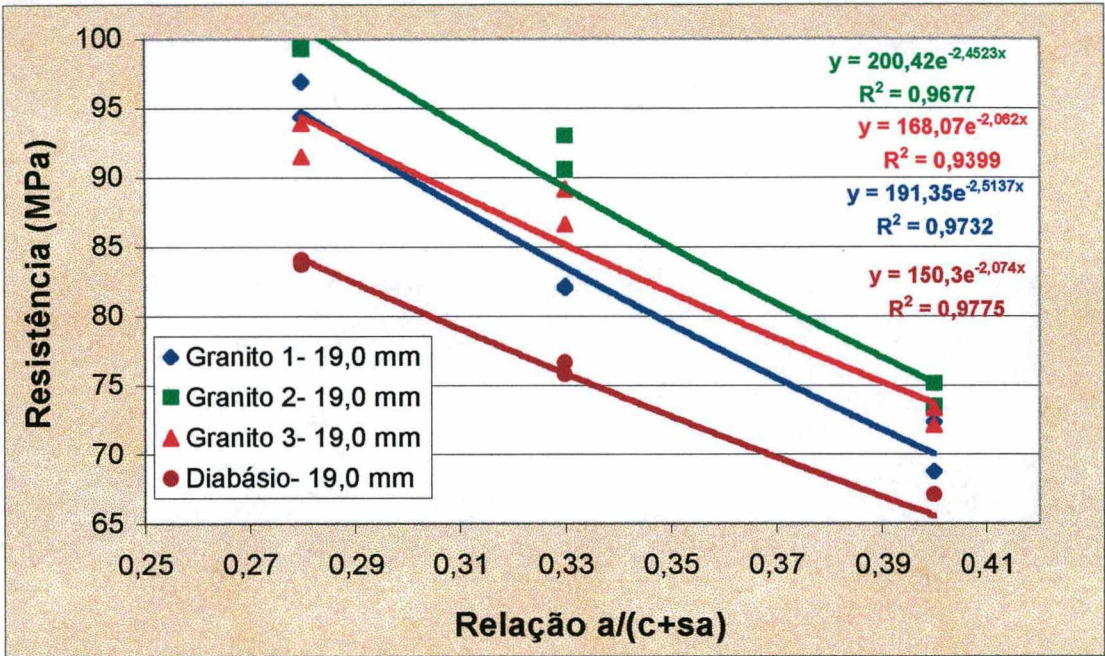


Figura 4.20 Influência do tipo de rocha do agregado graúdo na resistência à compressão dos concretos de alta resistência, agregados com 19,0 mm e coeficientes volumétricos bastante próximos.



## CAPÍTULO 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com todos os agregados de rochas investigadas, constatou-se a viabilidade técnica e econômica da produção de concretos de alta resistência, exceto para os concretos produzidos com agregados da rocha de diabásio, principalmente para a granulometria de 19,0 a 25,0 mm.

Concretos produzidos com consumo de cimento na ordem de  $400 \text{ Kg/m}^3$  apresentaram, aos 28 dias, níveis de resistência próximos a 70 MPa, independente do tipo de agregado e/ou dimensão máxima característica empregados.

Os concretos produzidos com agregados de rochas graníticas de textura rugosa (granito 1 e granito 2), nas relações água/materiais cimentantes iguais a 0,28 e 0,33, apresentaram níveis de resistência à compressão superiores aos de concretos produzidos com agregados de textura lisa (granito 3), independente da dimensão máxima característica. Entretanto, para a relação água/materiais cimentantes iguais a 0,40, não foi possível verificar diferenças significativas.

A evolução de resistência do concreto, ao longo do tempo, é influenciada pela relação água/materiais cimentantes, tipo de agregado empregado, dimensão máxima característica e forma do agregado graúdo.

Os concretos produzidos com relações água/materiais cimentantes igual a 0,40 atingiram, aos três dias de idade, níveis de resistência em torno de 40 MPa, independente do tipo de agregado e dimensão máxima característica. Com esse nível de resistência é possível desformar mais rapidamente e acelerar o ritmo de execução da estrutura.

Os concretos produzidos com agregados de diabásio apresentaram, em todas as relações água/materiais cimentantes e dimensões máximas características investigadas, os menores níveis de resistência, contrariando o que estabelecido pela FIP/CEB (1990). A causa mais provável para esse fenômeno pode estar vinculada à origem desta rocha. A

rocha do referido agregado é proveniente de um dique e na análise petrográfica do diabásio constatou-se elevado teor de piroxênio. O piroxênio possui um ou dois planos de clivagem, que são planos de ruptura.

Observou-se que os consumos de cimento, para uma mesma relação água/materiais cimentantes e trabalhabilidade, variam com a dimensão máxima característica do agregado e com o tipo de agregado.

A influência da forma dos agregados graúdos (estudados) no desempenho à compressão dos concretos cresce com o aumento da relação água/materiais cimentantes. As maiores perdas de resistência à compressão foram constatadas na maior relação água/material cimentante estudada, ou seja, 0,40.

Com relação água/materiais cimentantes na ordem de 0,33 e teores de pasta em torno de 35 %, foi possível produzir concretos com níveis de resistência entre 70 e 85 MPa, evidenciando, dessa maneira, a possibilidade de reduzir os efeitos de retração e fluência, através do emprego de baixos consumos de cimento e de se aumentar a capacidade potencial da durabilidade, conforme cita MEHTA (1994).

Foi possível constatar ganhos de resistência à compressão pelo emprego de agregados graúdos de menor dimensão máxima característica nos agregados de rocha de granito 3 e diabásio. Contudo, para concretos produzidos com agregados de granito 1 e granito 2, foi possível constatar exatamente o inverso, ou seja: ocorreu um ganho de resistência quando se empregou agregados com dimensão máxima característica de 25,0 mm ao invés de 19,0 mm. Além disso, a resistência de concretos produzidos com agregados de granito 1, com dimensão máxima característica de 25,0 mm, foi praticamente igual à resistência do concreto produzido com agregado de granito 1, dimensão máxima de 12,7 mm. Para os concretos produzidos com agregados de granito 2, os maiores valores de resistência foram atingidos empregando-se agregados de dimensão máxima de 25,0, 12,7 e 19,0 mm, respectivamente.

Dependendo do tipo de rocha de que são feito os agregados de granito e da dimensão máxima característica empregada, pode-se obter concretos, com relação água/materiais cimentantes igual a 0,28, que atingem resistência à compressão de 83 a 100 MPa.



Concretos produzidos com um mesmo tipo de agregado, com igualdade de relação água/materiais cimentantes, dimensão máxima característica, granulometria e trabalhabilidade mas com diferentes coeficientes de forma, apresentaram diferenças significativas de resistência à compressão aos 28 dias de idade.

Quando foi possível comparar o desempenho dos concretos produzidos com agregados graníticos de textura lisa com os concretos produzidos com os agregados graníticos de textura rugosa, em semelhantes coeficientes de forma, ver tabela 5.1, constatou-se que os concretos produzidos com agregados graníticos de textura lisa apresentavam resistência à compressão muito similar aos concretos produzidos com agregados graníticos de textura rugosa. Este fato pode estar ligado a não influência da rugosidade na aderência, conforme preconizado por MEHTA (1994).

A tabela 5.1 apresenta a resistência dos concretos produzidos com agregados com coeficientes de forma muito próximos.

Tabela 5.1 Desempenho à compressão de concretos produzidos com diferentes relações água/materiais cimentantes, com D.M.C= 19,0 mm e coeficientes de forma bastante próximos.

Tipo de agregado	Relação água/materiais cimentantes		
	0,28	0,33	0,40
Granito 1- Textura rugosa	92.4	87.8	72.1
Granito 2- Textura rugosa	93.52	90.24	77.3
Granito 3- Textura lisa	92.65	87.85	72.7

Obs. Os valores apresentados na tabela referem-se a resistência média em MPa.

As misturas de concreto produzidas com agregados graúdos de dimensão máxima característica igual a 25,0 mm apresentaram, no geral, desempenhos tão satisfatórios quanto as misturas feitas com agregados de dimensão máxima característica de 19,0 mm e 12,7 mm. Portanto, para a produção de concretos de alta resistência, com agregados naturais- da grande Florianópolis-, é aconselhável verificar, a priori, o desempenho de concretos produzidos com agregados de dimensão máxima igual a 25,0 mm, muito embora o método de dosagem do ACI não recomende o emprego de agregados graúdos

com dimensão máxima superior a 19,0 mm para concretos com resistências acima de 80 MPa, ou para resistência de projeto superior a 62 MPa. Para dosagens acima desse valor o referido método sugere o emprego de agregados com dimensão máxima característica igual a 12,7 ou 9,5 mm.

O efeito da mineralogia do agregado gráudo na resistência à compressão cresce com o aumento da dimensão máxima característica e com a redução na relação água/materiais cimentantes, dentro da faixa estudada. As variações internas de desempenho com agregados de dimensão máxima característica igual a 12,7 mm oscilam entre 88 e 99 %, as variações de desempenho de concretos produzidos com agregados de dimensão máxima de 25,0 mm oscilaram entre 72 e 99 %.

A influência do efeito da forma do agregado na resistência à compressão cresce com o aumento da relação água/materiais cimentantes na ordem de 0,40 deve-se, sempre que possível, descartar o emprego de agregados com reduzidos coeficientes de forma ou elevados índices de forma. Em se tendo apenas agregados com baixos coeficientes de forma pode ser interessante solicitar aos fornecedores que rebitem os agregados. Para concluir, para a produção de CAR, deve-se empregar agregados com coeficiente volumétrico superior a 0,2, conforme recomenda MEHTA (1994).

Considerando que a resistência do concreto obedece a teoria do elo mais fraco, é de extrema importância verificar: a) o valor máximo da menor dimensão do agregado (espessura), b) a maior dimensão do agregado (comprimento) e c) a relação entre a espessura e o comprimento, pois quanto maior essa relação maior será a esbeltez do agregado e, conseqüentemente, maior será a probabilidade desse agregado romper por tração ou cisalhamento. É importante ressaltar que tanto os concretos produzidos com agregados de granito 3 quanto os concretos produzidos com agregados de diabásio tiveram significativos ganhos de resistência quando se usou agregados com maior coeficiente volumétrico.

A escolha do tipo de agregado para a produção de concretos de alta resistência influencia com tal magnitude no consumo de cimento que ela pode determinar a competitividade ou não de uma empresa de concreto pré-misturado.

Quando se elaborou concretos utilizando agregados obtidos a partir do granito 3, com índice de forma semelhante ao do granito 1, pôde-se observar que os níveis de resistência à compressão alcançados por esses concretos forma ligeiramente superiores aos dos concretos produzidos com o granito 1. Assim sendo, pode-se atribuir ao efeito da forma, e não à mineralogia dos agregados, as diferenças de desempenho.

Para os concretos produzidos com os agregados de diabásio com diâmetro máximo de 25,00 mm forma infrutíferas as tentativas de aumentar a resistência com a elevação do consumo de cimento. Incrementos no consumo na ordem de 50 % ou mais geraram ganhos de resistência à compressão não superiores a 10 %.

Concluindo, os concretos de alta resistência são significativamente influenciados pela mineralogia, pela dimensão máxima característica e pela forma dos agregados graúdos e, assim sendo, deve-se realizar estudos preliminares que possibilitem definir quais, entre os agregados disponíveis, são os mais adequados ao emprego nos CAR; essa análise deve ser baseada no custo do concreto/ MPa.



## 6. Sugestões para novos trabalhos

O autor sugere que sejam realizados estudos mais aprofundados para verificar a influência da forma dos agregados graúdos no desempenho dos concretos, principalmente à compressão, à tração e ao consumo de material cimentante.

Sugere que se verifique a influência do teor de argamassa na resistência à compressão e no módulo de elasticidade dos concretos de alta resistência, tanto com areia natural quanto com areia artificial.

Sugere, outrossim, que se verifique a influência da resistência à compressão dos cimentos sobre a resistência à compressão dos concretos de alta resistência.



## 7. Referências bibliográficas

AGNESINI, M. V. C. Dosagem de microconcretos e concretos de alto desempenho: Estudo de caso. In: International Congress on high-performance concrete, and performance and quality of concrete structures. Florianópolis, Brasil-June, 1996. p.167-77.

AİTCIN, P. C. High Performance Concrete: From material to structure. London, Yves Malier, 1992. PART ONE KNOWLEDGE OF THE MATERIAL, The use of superplasticizers in high strength concrete, p. 14-33.

AİTCIN, P. C.; LAPLANTE, P.; BEDARD, C. Development and experimental use of 90 MPa field concrete. In: HIGH STRENGTH CONCRETE. S.l., American Concrete Institute, 1985, p. 51-70 (ACI SP-87).

AİTCIN, P. C.; MEHTA, P.K. Effect of coarse – aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete. ACI Materials Journal, v.87, n. 2 p. 103-107, Mar./Apr. 1990.

AİTCIN, P. C., SARKAR, L.S. Retardation effect of superplasticizers on diferent cement fractions. Cemente and concrete research, v. 17. p. 995-999, May 1987.

ALMEIDA, I. R. Betões de Alta Resistência e Durabilidade – Composição e Características. Tese de Doutorado. Universidade Técnica de Lisboa, 1990, 740 p.

ALMEIDA, I. R. A influência dos agregados na qualidade dos concretos de alta resistência. Revista do IBRACON, ano IV Nº 9, Agosto/Setembro 1994. p. 36-41

ALMEIDA, I. R. Estudos e pesquisa sobre concreto de alto desempenho realizados no Brasil. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUTURES (1. 1996: Florianópolis) Anais. Florianópolis, 1996. p. 82-93.

ALMEIDA, I. R. Revista do Instituto Brasileiro do Concreto. Ano IV- Nº 9- Agosto/Setembro. 1994, p. 36-41.

ALMEIDA, I. R. Aspectos práticos relacionados com a produção e a utilização dos concretos de alto desempenho. Boletim Técnico do CTC da Universidade Federal Fluminense. 1995, p. 73-82

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 221. Guide for the use of high – range water-reducing admixtures (superplasticizers) in concrete. ACI 212. 4R. Concrete international, v.er, n4, p. 40-47, April 1993.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 363 R. State-of-the-art report on High strength concrete. ACI Manual of Concrete Practice, Detroit, 1991, part 1. 48p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado – determinação da absorção de água em agregados miúdos: NBR 9777. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado – determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. NBR 7218. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado – determinação do teor de materiais pulverulentos. NBR 7219. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado – determinação da Abrasão “Los Angeles”. NBR 6465. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio de frasco de Chapman: NBR 9776. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado – determinação da composição granulométrica: NBR 7217. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado graúdo – determinação do índice de forma pelo método do paquímetro: NBR 7809. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados para concreto: NBR 7211. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados para concretos: NBR 7211. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Aditivos para concretos de cimento Portland: NBR 11768 (EB- 1763/92). Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Aditivos superplastificantes para concreto de cimento Portland: EB 1842. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado em estado compactado e seco – determinação da massa unitária: NBR 7810. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado em solto – determinação da massa unitária: NBR 7251. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – confecção e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos: NBR 5738. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – determinação da consistência pelo abatimento tronco de cone: NBR 7223. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – determinação da consistência pelo espalhamento do tronco de cone: NBR 9606. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto para fins estruturais: classificação por grupos de resistência: NBR 8953. Rio de Janeiro, 1992.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Controle tecnológico de materiais para concreto: NBR 12654. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Controle tecnológico de materiais componentes do concreto – procedimento: NBR 12655. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Ensaio de compressão em corpos de prova cilíndricos de concreto: NBR 5739. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto e execução de obras de concreto armado: NBR 6118. Rio de Janeiro, 1978.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto e execução de obras de concreto armado: NBR 6118. Rio de Janeiro, 1980.

AZEVEDO, M.T.; SILVA FILHO, A. F.; DA SILVA, A. S. Estudos e aplicação de concreto de alta resistência com microsilica. Revista do Ibracon. Ano III. Nº 8. Abril/Maio/Junho 1993.

BAALBAKI, W.; BENMOKRANE, B.; CHAALLAL, O.; AİTCIN, P. C. Influence of coarse aggregate on elastic properties of High-Performance Concrete. ACI Material Journal, v.88, nº 5, p. 499-503, 1991.

BAUER, L. A. F. Materiais de construção 1. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1992. Cap. 4. Agregados para o concreto, p. 104-119.

BUCHER, H. R. E. Desempenho de aditivos redutores de água FIP/CEB – “High strength Concrete – State of the Art Report (SR 90/1)”, Bulletin d’information N 197, August 1990, 61 p.

BUCHER, H. R. E. Desempenho de aditivos redutores de água de alta resistência em pastas, argamassas e concretos. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 30., 1988, Rio de Janeiro, agosto 1988. Anais...São Paulo: IBRACON, 1988, 10 p.



CAMERATO, R. C.; HERMANN, E. Estudo e aplicação de concreto de alta resistência com microssílica no Brasil. In: REUNIÃO ANUAL DO INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO, 30, Rio de Janeiro, 1988. Anais. Rio de Janeiro, IBRACON, 1988, v. 1, p. 81-93.

CAMPITELI, C. V. Porosidade do concreto. Boletim técnico do departamento de engenharia de construção civil. Escola Politécnica de São Paulo, BT PCC 09/87, 1987. 15 p.

CARNO, N. Effects of testing variables on the strength of high strength concrete cylinders. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES (1. 1996: Florianópolis) Anais. Florianópolis, 1996. p. 260-271.

CARRASQUILLO, P.M., CARRASQUILLO, R.L Evaluation of the use of current concrete practice in the production of high-strength concrete. ACI Materials Journal, Detroit, v. 85, n. 1, p. 49-54, Jan./Feb. 1988.

CARRASQUILLO, R. L.; NILSON, A. H.; SLATE, F. O. High strength concrete: an annotated bibliography. Cement, Concrete and Aggregate, v. 2, p. 3-19, 1980.

CARRASQUILLO, R. L.; CARRASQUILLO, P. M. Effect of using unbonded capping systems on the concrete strength of concrete cylinders. ACI Materials Journal, v. 85, Nº 3, May-June 1988, p. 141-147.

CUNHA, N. L. A influência da granulometria do agregado miúdo na qualidade dos concretos de Salvador. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 30., 1988, Rio de Janeiro, agosto 1988. Anais...São Paulo: IBRACON, 1988, 13 p.

DA SILVA, E. F. Concreto de alto desempenho: Estudo de propriedades mecânicas, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia Universidade Brasília, Brasília 1997, 166 p.

DALMOLIN, D. C. C. Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssílica. Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995. 286 p.

DE PAULA LEITE, A. R. C. A. et alli. Comportamento estrutural do reparo com concreto de elevado desempenho no vertedouro da usina elétrica Ilha Solteira. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES (1. 1996: Florianópolis) Anais. Florianópolis, 1996. p. 133-141.

DIAMOND, S. Sobre as bases científicas do uso da microssílica no concreto. São Paulo, 1984, 10 p./Trabalho apresentado no Seminário Tecnológico da Elkem Microssílica/.

DONONE, P., SOUTSOS, M. An approach to the proportioning of high strength concrete mixes. Concrete International, October 1994, p. 26-31.

DRAKE, K. D. High strength concrete in Seattle. In: HIGH STRENGTH CONCRETE. American Concrete Institute, 1985, p. 21-34. (ACI SP-87).

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAÎNTE- FIP/COMOTÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON- CEB. High strength concrete: state of the art report. London, 1990. 61 p.

FERRARI, A. A. Propriedades Mecânicas dos Concretos de Elevado Desempenho Fabricado com Diferentes Materiais. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Estruturas: Universidade Federal de Minas Gerais, Dezembro 1995.

FERREIRA E SILVA, L. Argamassas com microssílica: Estudo de consistência e resistência. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 30, 1988, Rio de Janeiro. Anais...São Paulo: IBRACON, 1988, 12 p.

FERREIRA, O. P.; FERREIRA e SILVA, L. O uso de superplastificantes na obtenção do concreto fluído. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 30., 1988, Rio de Janeiro. Anais... São Paulo: IBRACON, 1988, 15 p.

FERREIRA, O. P. O uso de superplastificantes na obtenção de concreto fluído. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 30., 1988, Rio de Janeiro, agosto 1988. Anais... São Paulo: IBRACON, 1988, 9 p.

GIACCIO, G.; et al. High strength concretes incorporating different coarse aggregates. ACI Materials e Journal, Detroit, p. 242-246, May/June 1992.

GIACCIO, G. and ZERBINO, R. Effect of aggregate type on behavior of high strength concrete. International congress on high-performance concrete, and performance and quality of concrete structures. Florianópolis. Brasil. June, 1996. p. 52-60.

GIACCIO, G., ROCCO, C., VIOLINI, D., ZAPPITELLI, J., ZERBINO, R. High-strength concretes incorporating different coarse aggregates. ACI Materials Journal, v. 89, Nº 3, May/June 1992, p. 242-246.

GIAMMSUSSO, S. E. Os aditivos na tecnologia dos concretos. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 30., 1988, Rio de Janeiro, agosto 1988. Anais...São Paulo: IBRACON, 1988, 12 p.

GJORV, O. E. High-strength concrete. In: ADVANCES IN CONCRETE TECHNOLOGY, Athens, 1992. Proceedings...Montreal: CANMET, 1994., p. 21-27.

GOMES, P.C.C. Estudo de parâmetros que influenciam a produção e as propriedades dos concretos de alta resistência. Dissertação de Mestrado, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 1995, 181 p.

GONÇALVES, J. R. A.; ALMEIDA, I. R.; SHEHATA, L. C. D. Influência do tipo de agregado graúdo nas propriedades do concreto de alta resistência. Anais da 36ª Reunião Anual do Ibracon, vol. I, Porto Alegre. Setembro/1994, p. 331-334



HATTORI, K. Experiences with mighty superplasticizer in Japan. In: SUPERPLASTICIZERS IN CONCRETE. Detroit, ACI SP-62, 1979. p. 37-66.

HELENE, P. R. L. Influência que as adições ao cimento Portland exercem no efeito de aditivos superplastificantes. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 30., 1988, Rio de Janeiro, agosto 1988. Anais...São Paulo: IBRACON, 1988, 6 p.

HELLAND, S. Colóquio sobre concretos de alta resistência. The use of high strength concrete. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 30., 1988, Rio de Janeiro. Anais...São Paulo: IBRACON, 1988, 12 p.

HERMANN, E., CAMERATO, C.R. Estudo e aplicação de concreto de alta resistência com microssílica na Brasil. In: REUNIÃO ANUAL DO INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO, 30, Rio de Janeiro, 1988. Anais...São Paulo, IBRACON, 1988, v. 1, p. 81-93.

HOLLISTER, S. C. Urgent need research in high-strength concrete. ACI Materials Journal, v. 73, nº 3, p. 136-7, 1976.

ISAIA, G. C. Revista Tecnológica, Santa Maria, UFSM, v. 14, p. 5-39, 1991.

LARRARD, F. High Performance Concrete: From material to structure. London, Yves Malier, 1992. PART ONE KNOWLEDGE OF THE MATERIAL, Ultrafine particles of making very high performance concretes, p. 34-47.

LEITE, A R. C. A de P. et al. Comportamento Estrutural do Reparo Com Concreto de Elevado Desempenho no Vertedouro da Usina Hidroelétrica Ilha Solteira, International congress on high-performance concrete, and performance and quality of concrete structures. Florianópolis. Brasil. June, 1996., p. 133-141.

LINIERS, A.D. Tecnologia y propiedades mecanicas del hormigon. Madrid, INTEMAC, 1993, 396 p.



LOBO, C.L., MULLINGS, G. M., e GAYNOR, R.D. Effect of Capping Materials and Procedures on the Measured Compressive Strength of High-Strength Concrete. American Society for Testing and Materials, p. 174-180.

MACEDO, P.H.S. et al., "Estudo de Correlações entre Resistência do Concreto à Compressão Axial, Compressão Diametral e Flexão, em função do Tipo e Textura Superficial do Agregado Graúdo," 23ª Reunião Anual de Pavimentação, Florianópolis, Outono, 1988, p. 1029-1049.

MEHTA, P.K., and AITCIN, P.C. "Effect of coarse aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete", ACI Materials Journal, v 87, n 2, March-Abril, 1990, p. 103-107

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M- Concreto: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: PINI, 1994.

MEHTA, P.K & AITCIN, P. C. Principles underlying production of high-performance concrete. Cement, Concrete and Aggregates, v. 12, nº 2, 1990, p. 70-78.

MONTEIRO, P.J.M.; MEHTA, P.K. Interaction between carbonate rock and cement past. Cement and Concrete Research, v. 16, nº 2, p. 127-134, Mar. 1986.

MORAES, M. F. Algumas propriedades mecânicas do concreto com microsilica. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1990, 161 p.

NAWY, P. E. E. G. Fundamentals of high strength high performance concrete. Longman Group Limited, England, 1996, 339 p.

NEVILLE, M. A. Propriedades do concreto. São Paulo: PINI, 1997, 2ª edição

→ NILSON, A. Concreto de alta resistência – desempenho como material e comportamento estrutural. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 30., 1988, Rio de Janeiro. Anais...São Paulo: IBRACON, 1988, 29 p.

OLIVEIRA, M. O. F.; GAMA, J.L.C.N; AGUADO, A. Influências da variabilidad de las características de las microsilices brasileñas en las resistencias a tracion y compresion del hormigon de altas prestaciones. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 25., Porto Alegre, 1991. Anais...Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1991, v. 4, p. 117-128.

PAULON, V. A. Estudos da microestrutura da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado. Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991, 190 p.

➤ PEREIRA NETO, P. M & DJANIKIAN, J.P. Algumas características do concreto de alta resistência com microsilica. Boletim técnico do departamento de engenharia de construção civil. Escola Politécnica de São Paulo.

PEREIRA NETO, P.M. O efeito do agregado graúdo em algumas propriedades do concreto de alta resistência com microsilica. São Paulo, 1994. Dissertação – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

PETRUCCI, E. G. R. Concreto de cimento Portland, 10. Ed. Porto Alegre, Globo, 1983., 307 p.

PINTO, A. D. A.; ROCHLITZ, R. C. O concreto de alta resistência do Edifício Trianon: MASP. In: COLÓQUIO SOBRE DOSAGEM DE CONCRETO. São Paulo, IBRACON, 1977, 14 p.

RAMACHANDRAN, V. S. Adsorption and hidration behavior of tricalcium aluminate – water and tricalcium aluminate- water systems in the presence of superplasticizers. Journal of the American Concrete Institute, v. 80, nº 3, p. 235-241 May/June 1983.

REGOURD-MORANVILLE, M. High Performance Concrete: From material to structure. London, Yves Malier, 1992. PART ONE KNOWLEDGE OF THE MATERIAL, Microstructure of high performance concrete, p. 3-14.

RODRIGUES FILHO, H.C.; SANTOS, M.V. Tecnologia do concreto de alta resistência; considerações gerais e sucintas. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 30., 1988, Rio de Janeiro. Anais...São Paulo: IBRACON, 1988, p. 47-66.

SAAD, M. N. A. Investigação e seleção de agregados para concreto In: REUNIÃO ANUAL DO INRACON, 30., 1988, Rio de Janeiro, agosto 1988. Anais...São Paulo: IBRACON, 1988, 38 p.

SABIR, B.B High-strength condensed silica fume concrete. Magazine of concrete research, v. 47, nº 172, p. 219-226, Sept., 1995.

SAEED, K. R. Technique of multi-step concrete mixing. Materials and Structures, 1995, v. 28, p. 230-234.

SILVA FILHO, A. F. Emprego do concreto de alto desempenho na Bahia. Um relato histórico: início – estágio atual – perspectivas. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES (1. 1996: Florianópolis) Anais. Florianópolis, 1996. p. 118-125.

SILVA, E.F. Concreto de alto desempenho: Aplicação pioneira em Brasília-Brasil. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES (1. 1996: Florianópolis) Anais. Florianópolis, 1996. p. 94-105.

SILVA, L. F., e Argamassas com microssílica – Estudo de resistência e consistência. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 30., 1988, Rio de Janeiro, agosto 1988. Anais...São Paulo: IBRACON, 1988, 8 p.

SOBRAL, H. S. Reologia e trabalhabilidade dos concretos. 2 ed. São Paulo, 1990, 84 p. (ET-62), da Associação Brasileira de Cimento Portland.

SOUZA, F. L. dos S. Concreto de alta resistência com cimento Portland de alto forno. São Paulo, 1992. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

VIOLINI, D., ZAPPITELLI, J., ZERBINO, R. "High-strength Concretes incorporating different coarse aggregates", ACI Materials Journal, v. 89, nº 3, May/Jun., 1992, p. 242-246.

VALOIS, J.G.C. O uso de concreto de alta resistência – Comentários sobre produção e comportamento no estado fresco. Anais da 36ª Reunião Anual do Ibracon, vol. I, Porto Alegre. Setembro/1994, p. 567-580.